יגאל גלילי דני עובדיה

יסודות הפיסיקה



במהדורה חדשה ומעודכנת

יסודות הפיסיקה

מאת

יגאל גלילי, דני עובדיה

בהתאם לתוכנית הלימודים החדשה

לצוות המורים המקצועי שסייע בעצותיו ובהערותיו לכתיבת הספר- תודות.

עריכה לשונית : אסתי רון

המשביר 5 חולון,

טלפון: 03-5595354

פקס: 03-5594808

ד.א. yesh@bezeqint.net

זוהי היא מהדורה מעודכנת ומורחבת של הספר, שבגרסתו הראשונה פנה רק לחלק מן התכנים, המוצגים כיום בספר. אנו עדים למצב בו הוראת הפיזיקה בארץ נתקלת בבעיות קשות. שני המבחנים הבינלאומיים (TIMSS ו-PISA) מראים, שבמדעים הידע של תלמידינו בחטיבת הביניים הוא ברמה נמוכה מאוד בהשוואה למדינות אחרות.

כיום נלמדים תכנים פיזיקאליים בתוך מקצוע בין-תחומי הקרוי "מדע וטכנולוגיה". מצב זה הביא בפועל לצמצום דרסטי בהיקף ובאיכות של הוראת הפיזיקה בחטיבת הביניים. עובדה זו משפיעה כמובן גם על רמת לימודי הפיזיקה בחטיבה העליונה. בחטיבת הביניים, התכנים הפיזיקאליים נלמדים לעתים על ידי מורים בעלי רקע ממדעים אחרים ולא ממדע הפיזיקה. נושאים רבים בפיזיקה, שנלמדו בעבר הוזנחו ונעלמו. עם זאת, יש צורך בנושאים אלו הן על מנת להמשיך ללמוד כל אחד ממקצועות המדעים בחטיבה העליונה, והן במטרה לרכוש אוריינות מדעית בסיסית, שבלעדיה לא ניתן לתפקד באופן מוצלח בחברה מודרנית.

הפיזיקה, כידוע, הוא המקצוע הבסיסי ביותר מבין מדעי הטבע. פיזיקה מעצבת תפיסת עולם של האדם, ובמובן זה חשיבותה הרבה מעבר למתמטיקה, המשמשת לה ככלי הכרחי. ללא ידע בסיסי בפיזיקה אין אפשרות לבנות כיום ידע משמעותי בשום תחום מדעי או טכנולוגי. ציבור רחב הבין זאת היטב, ומכאן גם הופעת המסגרות האלטרנטיביות הרבות, הקיימות והמנסות להשלים ולתקן את המעוות ואת החסר. כאלה הם חוגי העשרה ולמידה עבור תלמידים מתקדמים ונוער שוחר מדע, *מופת* ומסגרות אחרות. כיום, נוהגים המורים במסגרות אלה ליצור "דפי חומר" אשר מחליפים את ספרי הלימוד. כמן כן הם מפנים תלמידים לאינטרנט (הדבר דומה לזריקת תינוק לים בתקווה שילמד לשחות). בתי ספר אחדים מוציאים לאור חוברות ברמות איכות שונות. מורים עולים משתמשים בלית ברירה בספרים בשפות זרות. התוצאה היא בורות ותפיסות מוטעות רבות בקרב התלמידים.

ההידרדרות וההורדה הדרסטית בסטנדרטים של הידע בפיזיקה של תלמידים חידדה צורך בספרי לימוד, אשר יציגו תכנים פיזיקאליים בתפריט מורחב וכולל. בספר זה ניסינו להחזיר את הגלגל לאחור, וחזרנו לתכנים, שהיו פעם נחלת רוב התלמידים. אך כידוע, לא ניתן להיכנס לאותו נהר פעמיים, ולכן הספר כולל גם תכנים חדשים, שלא היו זמינים

בעבר בספרי לימוד הפיזיקה ברמת המבוא. התכנים יכולים לשמש בסיס להמשך הלימודים בכל מדעי הטבע.

כאמור, מלבד הנושאים המופיעים בתוכנית לימודי החובה, מופיעים בספר גם נושאים, שצומצמו לאורך השנים עקב השינויים השונים. האופן בו מוצגים הנושאים, מדגיש את המשמעות הפיזיקאלית שלהם, ולא רק את הצגת הנוסחה המתאימה. הודגשו הסברים איכותיים וניתן שימוש בגרפים. תכנים תיאורטיים הוצגו יחד עם הביסוס האמפירי (הניסויי), הדרוש ועם תופעות טבע, המקבלות הסבר על סמך תכנים אלה. הוצגו גם יישומים טכנולוגיים אחדים, המבוססים על הידע הנלמד. בכל פרק שולבו דוגמאות, שאלות פתוחות, שאלות רב ברירה ושאלות חישוב. הושם דגש מיוחד על שאלות איכותיות.

נציין במפורש כמה מהתכנים הנוספים, אותם תמצאו בספר:

מכניקה: הורחבו ייצוג התנועה וסוגי התנועה (קצובה, בתאוצה קבועה, תנועה מעגלית). הורחב ייצוגם של חוקי ניוטון. הופיעו נושאים כגון מומנט הכוח, מרכז הכובד, סוגי שיווי משקל, מנופים מסוגים שונים, מכונות פשוטות – גלגלת, מישור שופע, טריז, בורג, ציר ואופן, תמסורות, מתקף ותנע והקשר לאנרגיה קינטית בהתנגשויות ובהתפוצצות.

הידרוסטטיקה: חוקי ארכימדס ופסקל, מכשירים כמו סיפון, כלי שייט.

הידרודינמיקה : נוזלים וגזים (כולל חוק ברנולי).

גזים : חוקי פסקל, ארכימדס, בויל, גי- לוסק, שארל, מנדלייב-קליפרון.

הספר הוא ייחודי בגישתו לנושאים אחדים: ייצוגם של חוקי ניוטון, מנופים, מושג המשקל ומצב של חוסר משקל, זרם חשמלי ואחרים.

הספר מדבר פיסיקה ברמת מבוא, ובכך ניסינו לשמור על שפה בהירה וידידותית ומוקפדת בדיוקה המדעי. קהל היעד של הספר הוא:

1) תלמידי חטיבות הביניים (בעיקר בנושאי היחידות אנרגיה ואינטראקציה);
2) תלמידי כיתה י', הלומדים מכניקה ואף תלמידי י"א, הרוצים להכיר או להיזכר בידע שהם זקוקים לו להמשך הלימודים;
3) תלמידי 3 יח"ל בנושאי מכניקה וחשמל;
4) תלמידי 1 יח"ל בנושאי מכניקה ,חשמל, נוזלים וגזים, חום וטמ"פ;
5) תלמידי מוט"ב;
6) תלמידים במסגרות העשרה בפיסיקה או במדעים כלליים;

הספר מבוסס על ניסיון בהוראת הפיסיקה ועל תוצאות המחקר בהוראתה.

נאחל הצלחה רבה הן לתלמידיכם והן למורים.

נשמח להנחות אתכם כיצד לעבוד עם הספר, בהתאם לקבוצות הלימוד השונות, ונודה אם תשתפו אותנו בתגובות לתכנים שבספר, ותשלחו את הערותיכם לגביהם. הדבר יעזור לשפר את הספר במהדורות הבאות.

לשם כך נבקשכם להתקשר לטלפון: 04-9982555, נייד:0544775046 או בדואר אלקטרוני: danio56@walla.co.il .

בהצלחה.



אריסטו
322 – 384
לפנה"ס



ארכימדס
287 – 212
לפני הספירה



גלילאו גליליי
1564-1642



אייזק ניוטון
1727-1642



בלז פסקל
1662 – 1623



רנה דקארט
1650 - 1596



אנדרה- מרי אמפר
1836 - 1775



שארל- אוגסטין
דה קולון
1736-1806



ג'יימס פרסקוט ג'ול
1889 - 1818



גאורג אוהם
1878-1854



ג'יימס וואט
1819 – 1736



אלסנדרו וולטה
1827 - 1745

תוכן העניינים

פרק א' – תנועה 11-42

מבוא, מסלול ומערכת ייחוס, דרך והעתק, מהירות רגעית ומהירות ממוצעת, תנועה במהירות קבועה, תנועה בתאוצה קבועה

פרק ב' – תנועה מורכבת 43-65

תנועת גופים בנפילה חופשית, תנועה בליסטית, תנועה מעגלית, אפיון תנועה מעגלית

פרק ג' – כוחות 66-77

כוחות במגע, כוחות הפועלים מרחוק, חוקי הכוח

פרק ד' – מחוקי הכוח לחוקי ניוטון 78-101

החוק הראשון של ניוטון, החוק השני של ניוטון, החוק השלישי של ניוטון

פרק ה' – תנע ומתקף 102-114

תנע, מתקף, חוק שימור התנע

פרק ו' – כוחות אלסטיים 115-142

כוח אלסטי של קפיץ, מבנה מד כוח, חוק הוק, כוח נורמלי, מתיחות אלסטית בחוט או חבל

פרק ז' – משקל 143-160

משקל, חוסר משקל ו-"חוסר משקל", שינוי במשקל, תכונות המשקל

פרק ח' – מסה 161-174

מסה, הקשר בין מסה לבין כוח הכובד, מדידת מסה

פרק ט' – חיכוך 175-191

חיכוך סטטי, התועלת והנזק שבחיכוך הסטטי, חיכוך קינטי, התועלת והנזק שבחיכוך הקינטי

פרק י' – מומנט הכוח (כוחות הפועלים על גופים בעלי מידות) 192-223

מומנט הכוח, המנוף, יתרון מכאני, מנוף מהסוג הראשון, מנוף מהסוג השני, מנוף מהסוג השלישי והרביעי, מרכז הכובד, מצבי שיווי משקל (יציב, רופף, אדיש)

פרק יא' – כוח המשיכה העולמי 224-236

חוק המשיכה העולמי, גאות ושפל, השפעת השמש על הגאות והשפל, כדור הארץ – מדוע כדור ?

פרק יב' – הכוח החשמלי 237-253

מבוא, חוק קולון, תנועת מטען במסלול מעגלי, שדה חשמלי

פרק יג' – הכוח המגנטי 254-271

קטבים מגנטיים, הכוח בין קטבים מגנטיים, השדה המגנטי, השדה המגנטי של כדור הארץ, זרם חשמלי ושדה מגנטי, הכוח בין זרמים חשמליים, מהו מגנט טבעי ?

פרק יד' – עבודה ואנרגיה 272-294

עבודה, עבודה ואנרגיה, הגדרת האנרגיה

פרק טו' – מכונות פשוטות 295-314

המנוף, המישור המשופע, יתד, בורג ואום, גלגל וציר, גלגילה וגלגלת, תמסורות

פרק טז' – אנרגיה פוטנציאלית 315-352

ניסוי חקר- אנרגיה פוטנציאלית כובדית, במה תלויה אנרגיה פוטנציאלית כובדית, ניצול האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית, אנרגיה פוטנציאלית אלסטית, ניסוי חקר- אנרגיה פוטנציאלית אלסטית, ניצול האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של קפיץ

פרק יז' – אנרגיה קינטית (אנרגיית תנועה) 353-370

ניסויי חקר, חשיבותה של האנרגיה הקינטית

פרק יח' – תנע ואנרגיה 371-391

השוואה בין המושגים אנרגיה ותנע, התנגשויות, מעבר אנרגיה בהתנגשות אלסטית, התפוצצות

פרק יט' – אנרגיה פנימית והום 392-429

אנרגיה פנימית, טמפרטורה, חימום וחום, חום סגולי, קיבול חום,ניסוי חקר, חשיבותו של החום, מצבי הצבירה של החומר, אפיוני המעבר בין מצבי הצבירה, אנרגיה פנימית

פרק כ' – אנרגיה פוטנציאלית חשמלית 420-465

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית, המתח החשמלי, הזרם החשמלי, מקור מתח, התנגדות חשמלית וחוק אוהם, מדידות במעגל חשמלי, חיבור נגדים בטור ובמקביל, כמות החום הנפלטת מנגד חשמלי, כא"מ, מתח הדקים והתנגדות פנימית של המקור, ניסוי: כא"מ, מתח הדקים והתנגדות פנימית

פרק כא' – לחץ 466-475

לחץ

פרק כב' – תכונות נוזלים ולחץ בנוזלים 476-490

תכונות נוזלים, לחץ בנוזלים, חוק פסקל, המכבש ההידראולי

פרק כג' - מסה סגולית ומשקל סגולי 491-501

מסה סגולית, משקל סגולי

פרק כד' – לחץ הידרוסטטי 502-518

כוח ולחץ הידרוסטטי, הפרדוכס ההידרוסטטי, חשיבות הכוח ההידרוסטטי, חקר הפרדוכס ההידרוסטטי

פרק כה' – כלים שלובים 519-541

חוק הכלים השלובים, סיפון, לחץ אטמוספרי וברומטר, לחת אטמוספרי וריק, כדורי מגדנבורג

פרק כו' – חוק ארכימדס 542-555

גילוי החוק

פרק כז' – שקיעה, ציפה ורחיפה 556-576

שקיעה, ציפה, רחיפה, צוללת, יציבות כלי שיט

פרק כח' – חוקי הגזים 577-604

תכונות הגזים, הלחץ האטמוספרי, חוק פסקל, חוק ארכימדס, חוק בויל-מריוט, חוק גי-לוסק, חוק שארל, משוואת המצב של הגזים, מהי הטמפרטורה

פרק כט' – התפשטות תרמית של מוצקים ונוזלים 605-617

התפשטות "קווית" של מוצקים, התפשטות תרמית של משטחים, התפשטות תרמית של גופים בעלי נפח, התפשטות תרמית של נוזלים, תרמומטר גלילאו

פרק ל' – זורמים בתנועה 618-638

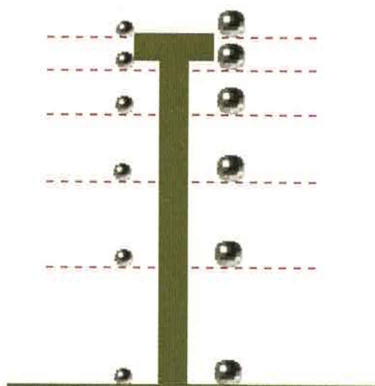
משוואת הרציפות בנוזלים, משוואת הרציפות בגז, משוואת ברנולי, צינור ונטורי וצינור פיטו, משוואת ברנולי עם הפרשי גובה, משפט טוריצ'לי, צמיגות, תנועת גופים בתוך נוזל (חוק סטוקס), אווירודינמיקה

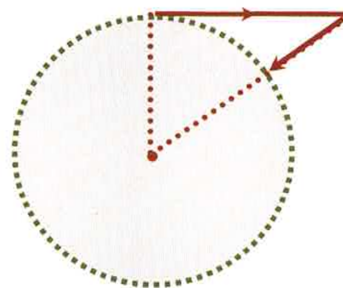
טבלת יחידות, נוסחאות וקבועים פיסיקליים 639-642

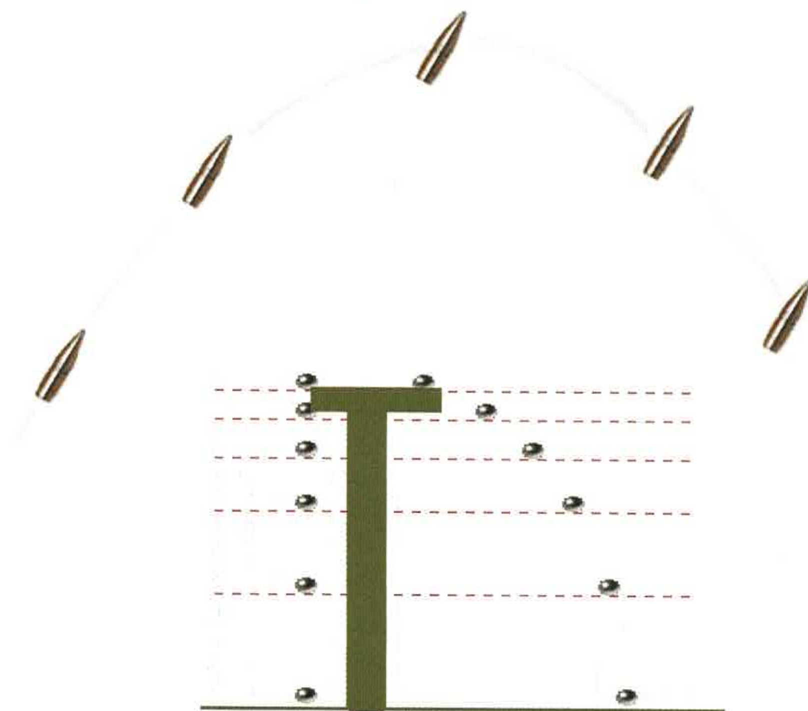
אינדקס 643-645

תנועה









עולם הטבע מסביב לנו מלא בתנועה. כל העצמים בו מצויים במצב של תנועה או מנוחה. לכן, המשימה הראשונה ששם לעצמו המדע מאז היווסדותו הייתה לתאר ולהבין את תנועת העצמים ללא הבחנה באיזה עצמים מדובר.

למדע אין בלעדיות על תיאור התנועה. בחיי היום-יום אנו מדברים תדיר על תנועה. כל תחומי הידע ספרות, היסטוריה, גיאוגרפיה, ביולוגיה ואחרים- מדברים על התנועה ומתארים אותה. תיאור זה נעשה בעזרת מונחים רבים: "פה", "שם", "נע", "עומד", "מהר", "מאט", "מאיץ", "הולך לשם", "בא לפה", ועוד הרבה אחרים.

לעומת שאר תחומי הידע, הפיזיקה אינה מסתפקת בכך, ומכניסה לתיאור זה את הדיוק הנדרש בהתאם למהותו של המדע המדויק. המושגים, אותם הזכרנו, כאשר הם מופיעים בשימוש שלא באופן פיזיקאלי, משמעותם מעורפלת ולא מדויקת. מה פירוש הביטוי "גוף נע מהר" או "מטוס טס גבוה"? האם הכוונה למהר כמו אצן או לגבוה כמו בנין? הפיזיקה אינה יכולה להסתפק בתיאורים כאלה, כי היא מדע מדויק.


אריסטו

הפיזיקה, כמדע, נוסדה על ידי המדען היווני הדגול אריסטו במאה ה-4 לפני הספירה. הוא חיבר את הספר הראשון הנושא את השם **פיזיקה**. אריסטו הגדיר את הפיזיקה כך:

פיזיקה היא המדע המתאר ומסביר שינויים בעולם הגשמי (החומרני).

סוג אחד של שינוי המתרחש עבור כל העצמים שביקום הוא **תנועה**. התנועה הוגדרה כשינוי של מקום המתרחש בזמן.

תנועה היא שינוי מקום של עצם, המתרחש בזמן.

במשך כ- 2500 שנה הוגדרו בפיזיקה באופן מדויק **מושגים** שמתארים את התנועה והמנוחה של העצמים הקיימים בטבע. בין המושגים האלו היו: המקום, המהירות, התאוצה והמסלול כפונקציה של הזמן.

אך תחילה נבהיר את המושג תנועה עצמו.



שתי תלמידות נוסעות ברכבל. הנוסעים האחרים, הנמצאים עם התלמידות בתא של הרכבל יראו אותן יושבות במנוחה, ואילו אנשים אחרים הנמצאים מחוץ לרכבל יתארו את התלמידות כנמצאות בתנועה. אלה ואלה צודקים. מבחינת הנוסעים ברכבל התלמידות אכן לא משנות את מקומן ולכן מצויות במנוחה, אך מבחינת האנשים על הקרקע, התלמידות נעות.

נוכל להסיק:

> **תנועה ומנוחה** הם מושגים יחסיים בלבד.

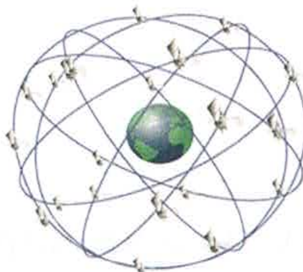
ולכן, על מנת לספק תיאור משמעותי של התנועה בכל תיאור תנועה יש לציין את **גוף הייחוס**: "התלמידות נעות יחסית לקרקע" ו-"התלמידות נמצאות במנוחה יחסית לתא של הרכבל". שני התיאורים קבילים. עם זאת, בחיי היום-יום לא תמיד אנו מקפידים לציין את גוף הייחוס. במצבים אלה ניתן לנחש את גוף הייחוס לפי התיאור של המצב.

מסלול ומערכת ייחוס

כאשר אנו או כול צופה אחר מתבוננים בגופים הנעים במרחב בכיוונים שונים, אנו רואים את הגוף הנע כתופס מקומות שונים בזמנים שונים. מקומות אלה יוצרים בדמיוננו קו מסוים במרחב. זהו **מסלול** התנועה.

> **מסלול התנועה** הוא קו המחבר בין המקומות, בהם היה או יהיה עצם, המבצע תנועה כלשהי.

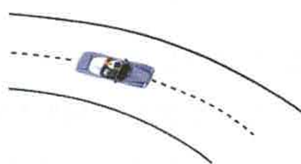
לצורך **הייצוג** אנו כמובן מציגים את המסלול במרחב ברישומים שלנו במחברת, בספר או במחשב. לכן, ייצוג המסלול דומה למסלול במציאות. בתרשים, למשל, **הצגנו** מסלולים מעגליים שונים של לוויין סביב כדור הארץ. במקרים אחדים ניתן לראות ממש גם את



מסלולי תנועה מעגליים של לוויין

המסלול האמיתי, כאשר, למשל, מטוס סילון משאיר עקבות כענן הנוצר מאדי מים של האטמוספרה, במקומות בהם נפלטו גזים מתוך מנוע הסילון, שהניע אותו.

דוגמה אחרת, מוכרת לא פחות, היא העקבות של המכונית על הכביש, או עקבות המגלשיים על הקרח. חשוב להבין שקו המסלול, או ייצוגו, אינם כוללים שום מידע על הזמן, בו נע הגוף בנקודת מרחב זו או אחרת.

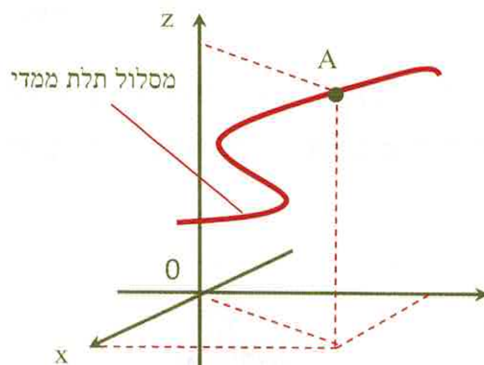


תנועה על פני כדור הארץ היא מקרה של תנועה דו ממדית

מסלול התנועה אינו כולל מידע על **הזמן** בו היה הגוף הנע בנקודות שונות של המסלול.

בפיזיקה, המדע המדויק, אנו לא רק מעתיקים את צורת המסלול, אלא מציגים אותו בתוך מערכת צירי ייחוס מאונכים זה לזה (משתמשים גם במערכות צירים שונות, בהתאם לסוג התנועה ולמטרת הייצוג). צירי הייחוס מאפשרים לקבוע את מיקום הגוף הנע בכל נקודה של המסלול. זוהי **הכתובת** של הגוף במרחב.

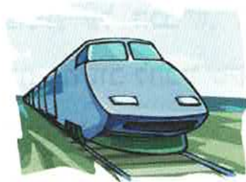
באופן כללי, התנועה במרחב מתוארת על ידי שלושה מספרים בהתאם לשלושת מימדי המרחב: **אורך, רוחב וגובה.** למצב זה אנו קוראים **תנועה תלת ממדית.** כזו היא למשל תנועת חלקיק אוויר באטמוספרה. בתרשים ניתן לראות את המסלול התלת-ממדי של נקודה A במרחב ושיטת הקביעה של הכתובת שלה במרחב. לצורך כך מעבירים קווים (הקווים המרוסקים שבתרשים) בניצב לצירים. נקודות חיתוך עם הצירים קובעים את הכתובת של הנקודה A במרחב. אלה הם מספרי הייחוס, המייצגים את מקום הגוף במרחב – **קואורדינאטות** של נקודה A. מסמנים אותן, לפי המסורת, באותיות x, y, z. המסורת אינה חוק, ולכן אינה מחייבת, כמובן.



מסלול תלת ממדי של תנועת הנקודה A במרחב: התנועה היא לאורך, לרוחב וגם לגובה

קיימים מקרים פשוטים יותר לתיאור: כך קורה כאשר למסלולו של עצם הנע כולו בתוך מישור, למשל. במקרה זה התיאור אינו דורש יותר משני מספרים. למצב זה קוראים **תנועה דו ממדית**. זהו מצבם של הגופים, הנעים על פני כדור הארץ, למשל.

ובמקרה פשוט עוד יותר, כאשר אנו מתארים תנועתו של גוף לאורך מסלול שכבר ידוע לנו (למשל, לאורך מסילת ברזל של רכבת בין ערים ידועות) די בתיאור בעזרת מספר אחד, שהוא המרחק מאחד הקצוות של המסלול.


מסלול חד ממדי בתנועה הרכבת בין ערים ידועות

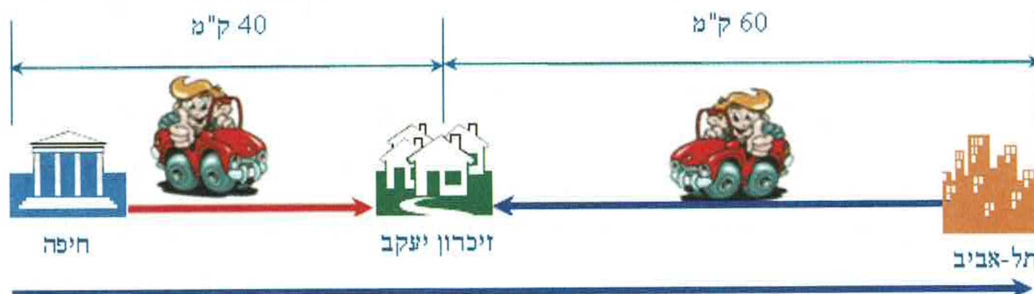
אנו נדון במקרה הפרטי הפשוט ביותר, כאשר המסלול של התנועה הוא קו ישר.

המסלול, כמו התנועה, הוא מושג יחסי. כך למשל במערכת ייחוס בה השמש נמצאת במנוחה, המסלול של כדור הארץ הוא מעגל מסביב לשמש, אבל במערכת צופה המצוי על פני כדור הארץ, כדור הארץ נמצא במנוחה, והשמש מבצעת תנועה במסלול מעגלי.

ועוד דוגמה חשובה. ילד נמצע על קרוסלה מסתובבת. עבור הצופה שמסתכל מלמעלה, הילד נע במסלול מעגלי. לא כך עבור ההורה על הקרקע, המתבונן בילד בגובה הקרוסלה. עבורו הילד נע הלוך וחזור, במסלול של תנודה.

דרך והעתק

נגדיר שני מושגים נוספים: **דרך והעתק**. נניח שרכב נוסע על כביש מחיפה לתל אביב, שהמרחק ביניהן הוא 100 ק"מ, ואח"כ חוזר לזיכרון יעקב הרחוקה מחיפה כ- 40 ק"מ.



הדרך שעברה שהמכונית, ואותה יראה גם מד הדרך, היא 160 ק"מ. הדרך שעברה המכונית אינה קשורה לכיוון בו היא נסעה (בדוגמה זו שמאלה או ימינה). לעומת זאת, השינוי בין המיקום הסופי של המכונית למיקומה ההתחלתי הוא רק 40 ק"מ. למטרות

מסוימות כגון: צריכת הדלק או זמן התנועה, חשובה הדרך הכוללת שעברה המכונית. למטרות אחרות, כמו ההתרחקות של המכונית ממקום יציאתה, חיפה, לא הדרך חשובה, אלא שינוי המיקום של המכונית.

נבחין אם כן בין שני המושגים:

דרך – המרחק הכולל שעובר גוף נע ללא קשר לכיוון תנועתו.

בדוגמה שלנו הדרך היא 160 ק"מ (אורך הקו הכחול בתרשים). מסמנים דרך באות S. אצלנו בדוגמה: S = 160ק"מ .

על מנת לתאר אותה התנועה, אך מבחינה אחרת, ההתרחקות של המכונית מחיפה, נגדיר גם גודל שמתאר את שינוי המיקום של הגוף. גודל זה מכונה **העתק**.

העתק – השינוי במיקום של גוף נע ביחס למקום בו התחיל את תנועתו.

בדוגמה שלנו העתק הוא 40 ק"מ (אורך הקו האדום בתרשים).

עתה נציין שבאופן כללי משתמשים בפיזיקה בשני סוגי גדלים: אלה שניתנים רק על ידי הערך המספרי שלהם, אותם מכנים **סקלרים** ואלה שדורשים בנוסף לערך המספרי גם את הידע על הכיוון במרחב. הגדלים מסוג זה מכונים **וקטורים**.

הדרך היא, איפוא, גודל סקלארי ואילו ההעתק, הדורש ציון הכיוון, הוא גודל וקטורי.



ניתן להבחין בדברים הבאים:

א) באופן כללי, הדרך וההעתק אינם שווים. הם יכולים להיות שווים רק כאשר הגוף מתרחק בקו ישר מהמקום בו התחיל את תנועתו.

ב) ההעתק של גוף קטן או שווה לדרך שהגוף עבר, אך אינו יכול להיות גדול ממנה.

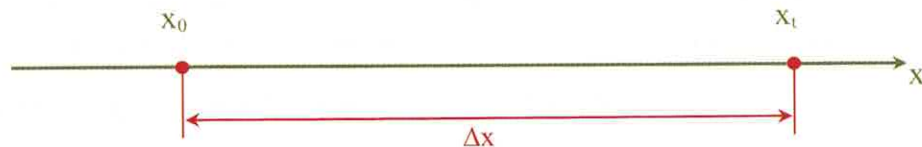
ג) גודל העתק בתנועה אינו מעיד על הדרך שהגוף עבר.

ד) העתק חיובי מעיד על כך, שהגוף התרחק ממקום המוצא בכיוון שנבחר כחיובי.

ה) העתק שלילי מעיד על כך, שהגוף התרחק ממקום המוצא בכיוון המנוגד לכיוון שנבחר כחיובי.

ו) העתק אפס מעיד על כך, שהגוף חזר למקום בו החל לנוע.

ניתן לקבל ביטוי לגודלו של ההעתק, אם נגדיר את מיקומו של הגוף בכל רגע ורגע באמצעות הקואורדינאטה x (תרשים).



נסמן את הקואורדינאטה של מקומו הסופי של הגוף ב- x_T ואת הקואורדינאטה של מקומו ההתחלתי של הגוף ב- x_0. מכאן: השינוי במקומו של הגוף, אותו הגדרנו כהעתק, יהיה שווה להפרש בקואורדינאטה x:

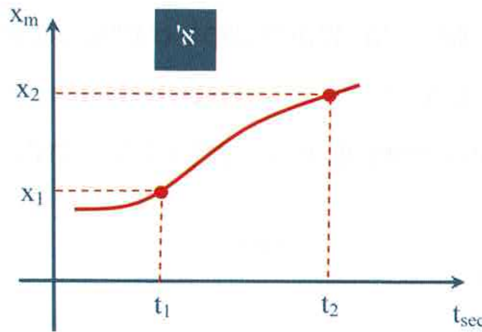
$$\Delta x = x_t - x_0 \qquad (1)$$

Δx – ההעתק. אצלנו בדוגמה: ק"מ 40= Δx.

כמו כל מרחק ההעתק נמדד במטרים (סימון m). עובדה זו מסמנים באופן הבא:

$[\Delta x] = m$

סוגי התנועה שונים זה מזה קודם כל בכמה מהר הגוף נע. המושג המאפיין היבט זה של התנועה הוא **מהירות,** כפי שהיא מוגדרת בפיזיקה. מגדירים מהירות כקצב שינוי המיקום, כלומר: היחס בין שינוי המקום לבין הזמן שעבר תוך כדי שינוי זה.



ניקח למשל מקרה של תנועה חד ממדית, כאשר מיקומו של הגוף מאופיין על ידי קוארדינאטה אחת – x. תוך כדי התנועה משתנה המיקום x. ניתן לתאר תנועה זו על ידי פונקציה של הקוארדינאטה x בזמן t (תרשים א'). חשוב להבין שגרף זה אינו מסלול.

במקרה זה המהירות שווה ליחס שבין שינוי המקום הנתון ע"י:

$$\Delta x = x_2 - x_1 \qquad (2)$$

ופרק הזמן שעבר תוך כדי שינוי זה:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \qquad (3)$$

הסימון כאן תואם מצב בו הגוף נמצא במקום x_1 בזמן t_1 ובמקום x_2 בזמן t_2. אזי המהירות של הגוף V היא:

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (4)$$

לפי הגדרת המהירות (4) נקבל גם את יחידות בהן נמדדת המהירות:

$$[V] = \frac{[x]}{[t]} = \frac{m}{sec}$$

ביטוי (4) אינו מתאים תמיד לתיאור התנועה. כך, למשל, כאשר הגוף חוזר למקומו ההתחלתי ההעתק מתאפס ונקבל מהירות אפס, למרות שהגוף נע. כאשר בזמן תנועתו הגוף מגביר ומוריד את קצב התקדמותו בחלקים השונים, גם אז ביטוי (4) אינו משקף

את המציאות באופן מלא. למעשה ניתן להתייחס לביטוי (4) כמתאר את קצב התנועה בממוצע על כל פרק הזמן Δt. לכן מגדירים **מהירות ממוצעת** $\overline{V}$:

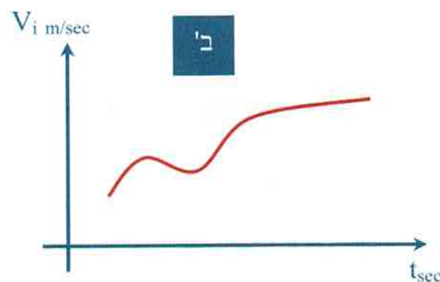
$$\overline{V} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (5)$$

ואם מתעניינים בקצב התנועה בזמן מסוים, ממשיכים להשתמש בביטוי (4) אך מנסים להקטין כמה שאפשר את פרק הזמן Δt, כך שהגוף לא יספיק לשנות משמעותית את תנועתו. כך מגדירים את המושג **מהירות רגעית** V_i.

$$V_i = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)_{\Delta t \to 0} \qquad (6)$$

למרות שתמיד מדובר בפרק זמן ולא ברגע מסוים, אנו מתייחסים למהירות רגעית כאשר מקטינים מאוד את פרק הזמן סביב הרגע, בו מתעניינים במהירות הגוף.

לדוגמה: אם נדמיין תנועה שהקצב שלה משתנה מרגע לרגע, ונציג את התלות של המהירות הרגעית כפונקציה של הזמן, נקבל עקומה כלשהי (תרשים ב'), המשקפת את העובדה, שהמהירות הרגעית של הגוף הנע משתנה.





שני הגרפים א' ו- ב' אינם דומים למסלול התנועה אלא מייצגים את התלות של המיקום או של מהירותו הרגעית של הגוף, הנע בזמן.

תנועה במהירות קבועה

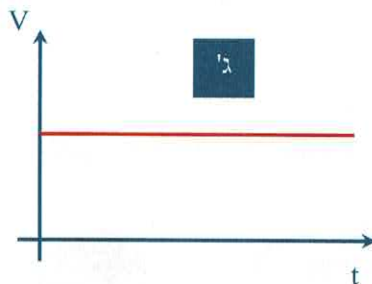
במציאות, גופים נעים במהירויות שונות, אך שאיפתו של המדע היא תמיד לבודד את סוגי התנועה הפשוטים ביותר, אשר ישמשו בסיס לטיפול במקרים מסובכים יותר. כיום אנו רואים את מקרה התנועה הפשוט ביותר כתנועה בקו ישר ובקצב קבוע. במקרה זה ביטוי

(4) עבור המהירות הממוצעת לא ישנה את ערכו כאשר נקטין את פרק הזמן Δt לרצוננו, כלומר:

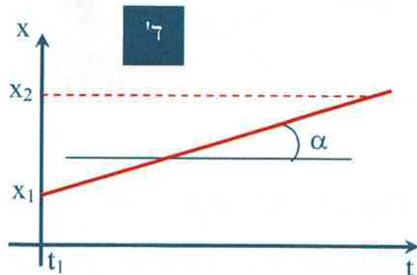
$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{קבוע} \qquad (7)$$

תנועה בה בפרקי זמן שווים כלשהם יש לגוף העתקים שווים מכונה **תנועה קצובה** (שוות קצב או תנועה במהירות קבועה), או במילים אחרות: קצב שינוי המיקום של הגוף הוא קבוע.





בהתאם להגדרה זו ניתן להציג את התנועה במהירות קבועה על ידי הגרף שבתרשים ג'.



הגדרה זו מאפשרת גם להציג את שינוי ההעתק בסוג תנועה זה. מביטוי (7) מקבלים:

$$\Delta x = V \cdot \Delta t \qquad (8)$$

או עבור ההעתק x בכל רגע ורגע t נקבל:

$$x = x_1 + V \cdot (t - t_1) \qquad (9)$$

הגרף של ביטוי (9) מיוצג בתרשים ד'.

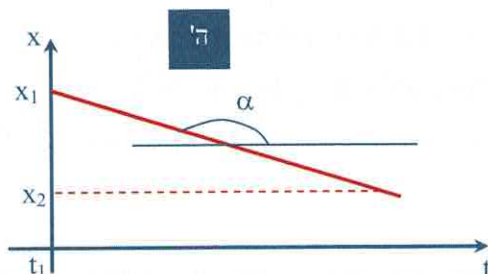
נפרט יותר את הקשר בין שני הגרפים.

מביטוי (9) נובע ישירות, שגודל המהירות V קובע את גודל השיפוע בגרף העתק כפונקציה של הזמן. כלומר, **ככל שהשיפוע גדול יותר המהירות גבוהה יותר.**

הבנה זו מאפשרת להציג באופן גרפי, וכך להפנים יותר את משמעות המונחים מהירות "חיובית" ו"שלילית". לפי הגדרת המהירות (4), מהירות חיובית פירושה שהעתק של הגוף הוא חיובי כלומר:

$$\Delta x = x_2 - x_1 > 0$$

ולכן: $x_2 > x_1$ (באפיון התנועה זמן תמיד הולך קדימה ומסכימים ש: $t_2 > t_1$). זהו המקרה של גרף ד'.



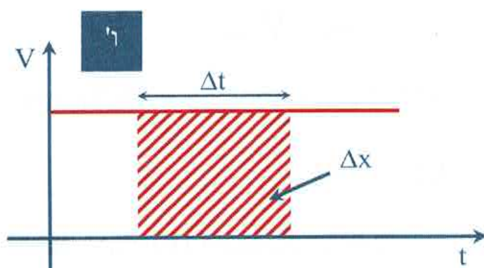
לעומת זאת כאשר אומרים, שמהירות היא "שלילית" פירושו, שהעתק של הגוף הוא שלילי כלומר:

$$\Delta x = x_2 - x_1 < 0$$

ולכן: $x_2 < x_1$. זהו המקרה של גרף ה'.



מייחסים למהירות סימן (מהירות חיובית או שלילית), כאשר רוצים להגיד, שעם הזמן הקואורדינאטה של הגוף עולה (או יורדת).

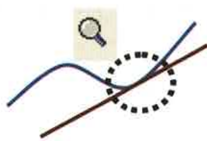


אם נחזור לגרף המהירות כפונקציה של הזמן (תרשים ג') נוכל לוודא שהשטח מתחת לגרף (המלבן המקווקו) הוא העתק של הגוף בפרק הזמן Δt (תרשים ו'). שכן:

$$\Delta x = V \cdot \Delta t$$

השטח שמתחת לגרף המהירות כפונקציה של הזמן מייצג את ההעתק של הגוף הנע.

מסקנה זו נכונה לא רק כאשר המהירות היא קבועה. זאת משום שבמציאות בפרק זמן די קטן ניתן להחשיב כל תנועה כתנועת שוות קצב (נסו לדמיין התקרבות לקו עקום. במרחק מספיק קטן יראה הקו כקו ישר. זאת בדומה לעובדה ששטח פני הארץ נראה לנו כמישור, למרות שבעצם מדובר על פני הכדור).





כשמסתכלים מקרבה גדולה יותר גם קו עקום נראה כקו ישר...

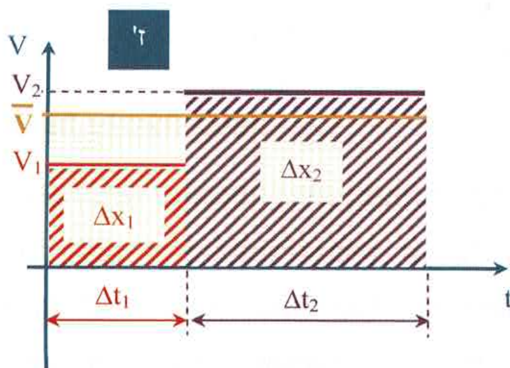
נשים לב גם לכך, שיחידות השטח אשר מתחת לגרף כלשהו אינן מייצגות בהכרח מטרים מרובעים, אלא מכפלה של מימדי הגדלים, אותם מייצגים הצירים. כך בתרשים ה' מתקבל השטח ביחידות:

$$[A] = \frac{m}{sec} \cdot sec = m$$

נחזור עתה למושג של **מהירות ממוצעת** אשר הוגדר על יד ביטוי (5):

$$\overline{V} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

ניתן לראות, שכאשר הגוף נע במהירות, שאינה קבועה, משמעות ההגדרה של המהירות הממוצעת היא החלפה של תנועה מסוימת, בה המהירות אינה קבועה בתנועה שוות מהירות בגודל $\overline{V}$, כזאת שהעתק Δx של הגוף בזמן Δt משתווה בשתי התנועות.



נמחיש את משמעות המהירות הממוצעת במקרה של תנועה, בה הגוף נע במהירות קבועה V_1 במשך זמן Δt_1, ומיד אחרי כן במהירות V_2 במשך פרק זמן נוסף Δt_2. נציג את הגרף של המהירות בתלות בזמן בתרשים ז'.

על הגרף סומן העתק של הגוף בשני חלקי התנועה: השטחים שסומנו בקווים אלכסוניים. העתקים בשני פרקי הזמן הם:

$$\Delta x_1 = V_1 \cdot \Delta t_1 \qquad \text{ו-} \qquad \Delta x_2 = V_2 \cdot \Delta t_2 :$$

לפי הגדרת של המהירות הממוצעת, זו המהירות $\overline{V}$ בה לגוף העתק $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$ לאחר שעובר פרק זמן $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$. כלומר: $\Delta x = \overline{V} \cdot \Delta t$.

על הגרף, זהו השטח מתחת לקו המהירות $\overline{V}$ (שטח בצהוב), המייצג את המהירות הקבועה לאורך כל הזמן Δt.

אפשר לראות, שהמהירות הממוצעת מצויה בין המהירויות שהיו לגוף: V_1 ו- V_2. יותר מכך: ניתן לראות ש- $\overline{V}$ מתקרבת יותר לאותה המהירות שהייתה לגוף במשך זמן רב יותר. תוצאה זאת נובעת גם מן החישוב המסודר של המהירות הממוצעת, אשר במקרה זה מקבל את הצורה הבאה:

$$\overline{V} = \frac{V_1 \cdot \Delta t_1 + V_2 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \qquad (10)$$

חישוב ממוצע המתחשב בתרומה יחסית של ערך מסוים לממוצע נקרא חישוב "משוקלל" (מתחשב במשקל במובן של גודל התרומה). רואים שבמקרה של תרומה שווה לכל ערך $\Delta t_1 = \Delta t_2$, מתקבל ממוצע רגיל:

$$\overline{V} = \frac{V_1 \cdot \Delta t + V_2 \cdot \Delta t}{\Delta t + \Delta t} = \frac{V_1 + V_2}{2} \qquad (11)$$

תנועה בתאוצה קבועה

זהו סוג נוסף של תנועה הנחשב כבסיסי. בתנועה זו הגוף משנה את מהירותו V, אך עושה זאת בקצב קבוע, כלומר: בפרקי זמן שווים מתרחש אותו השינוי במהירות. אומרים שקצב שינוי המהירות נשאר קבוע. כדי לתאר באופן מדויק את שינוי המהירות, מגדירים מושג חדש – תאוצה. **תאוצה** מוגדרת כגודל השווה לקצב שינוי המהירות של גוף נע.

תאוצה מוגדרת כגודל השווה לקצב שינוי המהירות של גוף נע.

נבטא את התאוצה באופן מתמטי: נניח שלגוף הנע מהירות V_1 בזמן t_1, ובזמן t_2 מהירות V_2. אזי שנוי המהירות המתרחש בפרק הזמן $\Delta t = t_2 - t_1$ הוא:

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

בהתאם להגדרתה המילולית של התאוצה נרשום את ההגדרה שלה באופן הבא:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad (12)$$

מן ההגדרה נובעות יחידות המדידה של התאוצה:

$$[a] = \frac{[V]}{[t]} = \frac{m/sec}{sec} = \frac{m}{sec^2} \qquad (13)$$

עתה נוכל לדמיין, כמקרה הפשוט ביותר, את התנועה שבה התאוצה היא קבועה:

תנועה בה קצב שינוי המהירות הוא קבוע מכונה **תנועת שוות תאוצה.**

או, כפי שרושמים:

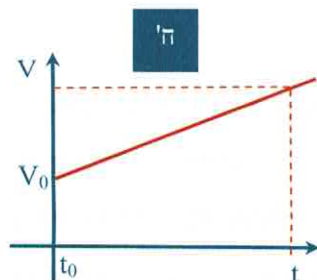
$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{קבוע} \qquad (14)$$

נוכל להגיע לתלות מהירותו של גוף הנע בתאוצה קבועה בזמן על סמך הגדרת התאוצה. נציב בנוסחה (12) את שינוי המהירות בפרק הזמן שבין התחלת המעקב אחרי הגוף ברגע t_0 וזמן כלשהו t. את מהירות הגוף בזמן t_0 נסמן ב- V_0 ואת מהירות הגוף בזמן t נסמן ב-V. אזי נקבל:

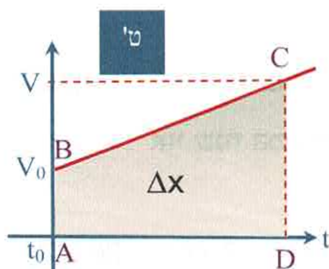
$$a = \frac{V - V_0}{t - t_0}$$

ומכאן:

$$V = V_0 + a \cdot (t - t_0) \qquad (15)$$



ביטוי (15) מראה שתלות המהירות V כפונקציה של הזמן היא תלות ליניארית, והוא תואם לגרף בצורה של קו ישר (תרשים ח'). השיפוע של קו ישר זה נקבע על ידי התאוצה a. כלומר, ככל שהתאוצה גדולה יותר המהירות עולה באופן תלול יותר עם הזמן.



נזכיר עתה, שהשטח מתחת לגרף המהירות כפונקציה של הזמן פירושו העתק של הגוף הנע. הצורה שנוצרה היא טרפז ABCD (תרשים ט'), ולכן נחשב את השטח שלה לפי הנוסחה הידועה מהגיאומטריה:

$$\Delta x = \frac{AB + CD}{2} \cdot AD = \frac{V_0 + V}{2} \cdot \Delta t \qquad (16)$$

בכתיבה זו השתמשנו במשמעות של ערכי הצלעות לפי תרשים ח'. נשתמש גם בביטוי עבור תלות המהירות בזמן (15) ונקבל:

$$\Delta x = \frac{V_0 + V_0 + a \cdot (t - t_0)}{2} \cdot (t - t_0)$$

קיבלנו, שאת העתק של גוף הנע בתנועה שוות תאוצה ניתן לחשב על סמך הביטוי:

$$\Delta x = V_0 (t - t_0) + \frac{1}{2} a (t - t_0)^2 \qquad (17)$$

נציין, שכאשר גוף מתחיל את תנועתו ממצב המנוחה ($V_0=0$) מקבלים:

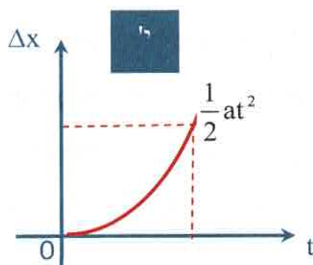
$$\Delta x = \frac{1}{2} a (t - t_0)^2 \qquad (18)$$

וכאשר מתחילים מעקב אחרי התנועה מהרגע שקובעים כ- $t_0=0$, מקבלים את הביטוי בצורה הפשוטה והמוכרת ביותר:

$$\Delta x = \frac{1}{2} a t^2 \qquad (19)$$



קיבלנו, שהקשר בין ההעתק של גוף הנע בתנועת שוות תאוצה לבין זמן התנועה הוא קשר ריבועי, ולכן הגרף של תלות זו הוא פרבולה.

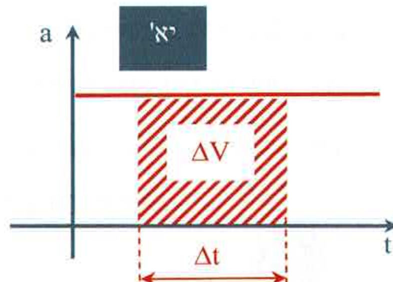


כאמור, הגרף של ההעתק כפונקציה של הזמן במקרה של תנועה שוות תאוצה (19) הוא פרבולה, אשר במקרה של תאוצה חיובית ($a>0$) מתבטא בגרף מסוג שמוצג בתרשים י'. גרף זה משקף את העובדה, שבתנועה שוות תאוצה קצב העלייה של

ההעתק גבוה יותר מהמקרה של תנועה שוות מהירות (שוות קצב כמו בתרשים ד').

נצביע על קשר נוסף בין הגדלים, המתארים את התנועה.

עתה נפנה אל גרף של תלות התאוצה בזמן עבור תנועה שוות תאוצה (תרשים יא'):



הגרף הוא קו ישר, המקביל לציר הזמן. נתעניין בשטח מתחת לגרף זה בפרק זמן Δt. זהו שטח המלבן המסומן בתרשים. כידוע שטח זה שווה למכפלה של בסיס בגובה. מקבלים עבור השטח $a \cdot \Delta t$. בביטוי זה אנו מזהים ביטוי לשינוי המהירות אשר לפי הגדרת התאוצה (12) שווה:

$$\Delta V = a \cdot \Delta t$$



כפי הנראה, השטח שמתחת לגרף התאוצה כפונקציה של הזמן מייצג את **שינוי המהירות** של הגוף בפרק הזמן בו מתרחש השינוי.

ניתן לראות שהמימד של שטח זה תואם ליחידות של המהירות:

$$[A] = [a] \cdot [t] = \frac{m}{sec^2} \cdot sec = \frac{m}{sec} = [V]$$

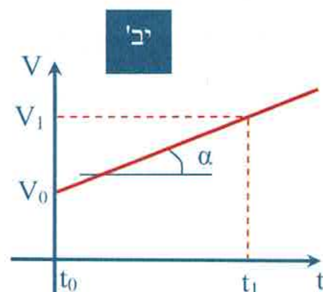
בדומה לטענה שהשטח שמתחת לגרף המהירות כפונקציה של הזמן שווה להעתק הגוף, בכל סוגי התנועה, כך גם ניתן לטעון שהשטח מתחת לגרף התאוצה כפונקציה של הזמן שווה לשינוי המהירות, בכל סוגי התנועה.

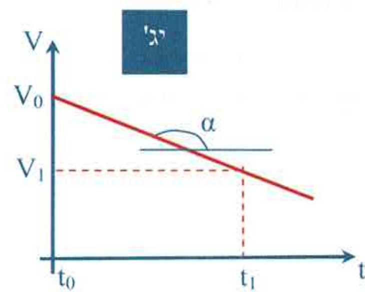
גם לגבי מושג התאוצה קיים הסכם לכינויים כמו תאוצה "חיובית" ו"שלילית". כדאי להבהיר אותם ולהציגם באופן גרפי:

בתרשים ח' הצגנו תלות של המהירות בזמן בתנועה שוות תאוצה. זהו ייצוג גרפי לביטוי (15). השיפוע של הגרף נקבע על ידי מקדם התלות הליניארית של המהירות בזמן. מקדם זה הוא תאוצה a.

תרשים י"ב מציג תלות זו במקרה של תאוצה חיובית. הגרף ממחיש,שמשמעות התאוצה החיובית היא הגברת המהירות בכיוון שלה כלומר: $V_1 > V_0$ כאשר זמן $t_1 > t_0$.

בדומה, תרשים יג' מציג תנועה שוות תאוצה כאשר התאוצה היא שלילית. משמעות הדבר ש: $V_0 > V_1$ כאשר זמן $t_1 > t_0$. במקרה זה משתמשים גם במונח האטה: "הגוף מאט את תנועתו.





להשלמת הייצוג של התנועה שוות התאוצה יש להציג את הגרף של ההעתק כפונקציה של הזמן. מדובר בייצוג של הביטויים (17) ו- (18) מציינים תלות ההעתק של הגוף בזמן עבור גוף, הנע בתנועה שוות תאוצה. בשני המקרים מדובר בפונקציה ריבועית עם ובלי מהירות התחלתית. לכן, בשני המקרים הגרף המייצג יהיה בעל צורה של פרבולה (תרשימים י"ד ו- טו').

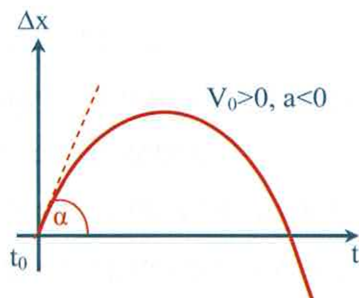
בכל אחד מהגרפים נרשמו הערכים של V_0 ושל a להם מתאים גרף מסוים. בנוסף צוין שיפוע של כל גרף בתחילת התנועה, אשר נקבע על ידי המהירות V_0 באותו רגע t_0.

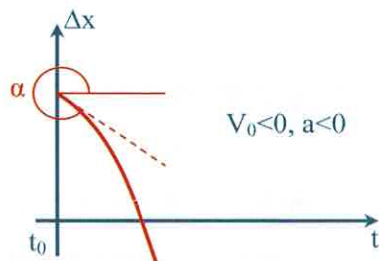
חשוב להבין, שרק מהסתכלות כללית על הגרפים המייצגים את התנועה ניתן ללמוד הרבה על אופי התנועה.

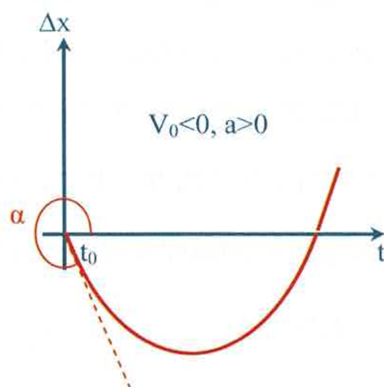


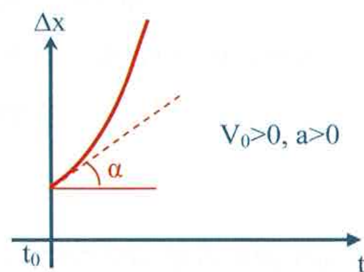


$$\Delta x = V_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$



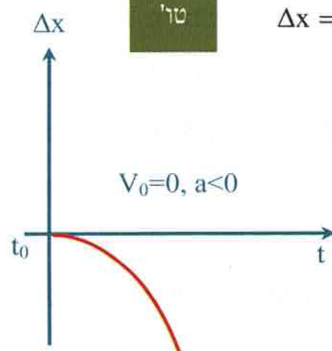


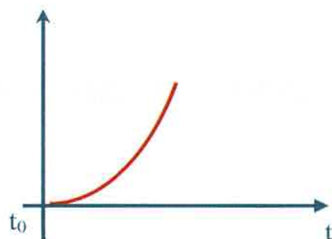






$$\Delta x = \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$





מה למדנו בפרק זה?

1. **פיזיקה** היא המדע המתאר ומסביר שינויים בעולם הגשמי.
2. **תנועה** היא שינוי מקום על ידי עצם, המתרחש בזמן.
3. תנועה ומנוחה הם מושגים יחסיים בלבד.
4. **מסלול התנועה** הוא קו המחבר בין המקומות בהם היה או יהיה מצוי עצם המבצע תנועה.
5. **מסלול התנועה** אינו כולל מידע על **הזמן**, בו היה הגוף שבתנועה בנקודות שונות של המסלול.
6. קיימים מקרים של תנועה תלת- ממדית, דו- ממדית וחד- ממדית בהתאם לכמות הקואורדינאטות, הנדרשות כדי לתאר את התנועה באופן מלא.
7. **דרך** – המרחק הכולל שעובר גוף נע ללא קשר לכיוון תנועתו.
8. **העתק** – השינוי במיקום של הגוף הנע ביחס למקום, בו התחיל את תנועתו.
9. מהירות התנועה היא קצב שינוי המקום של גוף נע.
10. מהירות ממוצעת $\overline{V}$ מוגדרת כ: $\overline{V} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.
11. **המהירות הרגעית** V_i היא גודל המהירות של הגוף הנע, כאשר מקטינים עד כמה שאפשר את פרק הזמן Δt, בהגדרת המהירות: $V_i = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)_{\Delta t \to 0}$.
12. תנועה, בה בפרקי זמן שווים כלשהם לגוף יש העתקים שווים, או התנועה, בה קצב שינוי המיקום של הגוף הוא קבוע, מכונה **תנועה קצובה** (שוות קצב או תנועה במהירות קבועה).
13. קואורדינאטה x של הגוף, שנע במהירות קבועה, משתנה לפי התלות הבאה בזמן:

$$x = x_1 + V\cdot (t - t_1)$$

14. השטח שמתחת לגרף המהירות כפונקציה של הזמן מייצג את ההעתק של הגוף הנע.
15. בהתבוננות קרובה למדי נראה קו עקום כקו ישר.
16. במקרה של תנועה מורכבת מתנועות שונות מהירות ממוצעת מהווה ממוצע משוקלל.

17. **תאוצה** מוגדרת כגודל השווה לקצב שינוי המהירות של גוף $a = \frac{\Delta V}{\Delta t}$.

18. תנועה בה קצב שינוי המהירות הוא קבוע מכונה **תנועת שוות תאוצה.**

19. המהירות בתנועה שוות תאוצה מהווה פונקציה ליניארית של הזמן:

$$V = V_0 + a \cdot (t - t_0)$$

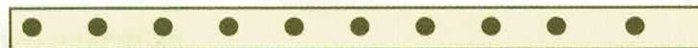
20. ההעתק של גוף המבצע תנועה שוות תאוצה מהווה פונקציה ריבועית של הזמן:

$$\Delta x = V_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

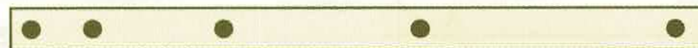
21. השטח שמתחת לגרף התאוצה כפונקציה של הזמן מייצג את **שינוי המהירות** של הגוף בפרק הזמן בו מתרחש השינוי.

22. הגרפים שמייצגים את תלות ההעתק, את המהירות ואת התאוצה בזמן יחד עם גרף מסלול התנועה, מתארים באופן מלא את הסוגים השונים של תנועת הגופים במציאות.

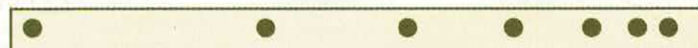
23. כך נראה רישום התנועה, כאשר גוף נע בקצב קבוע (במהירות קבועה) :



כך נראה רישום התנועה, כאשר גוף נע במהירות עולה:



כך נראה רישום התנועה כאשר, גוף נע במהירות יורדת :



1) מכונית מתחילה להאיץ ממצב של מנוחה. ברגע תחילת התנועה:

א. תאוצת המכונית שווה לאפס.

ב. מהירות המכונית שונה מאפס.

ג. גם המהירות וגם תאוצת המכונית שוות לאפס.

ד. תאוצת המכונית שונה מאפס.

2) אופנוען קורא את מד הקילומטר של האופנוע שלו בבוקר ובצהריים. ההפרש בין הקריאות:

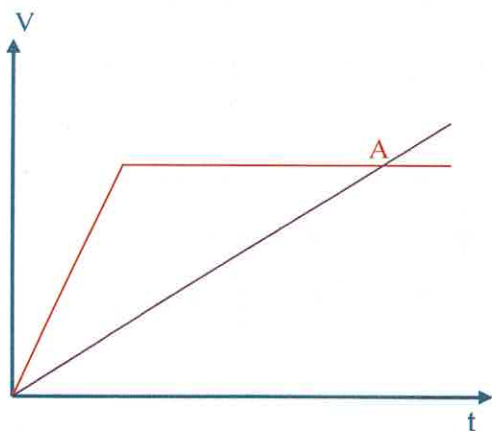
א. מציין את הדרך שהוא עבר.

ב. יכול לייצג את ההעתק שלו.

ג. יכול לייצג גם את הדרך וגם את ההעתק.

ד. כל התשובות נכונות.

3) הגרפים הבאים מתארים את מהירותם של 2 כלי רכב שיצאו באותו הזמן מאותו המקום.



האם נכון ש:

א. נקודת A מציינת את מקום המפגש של כלי הרכב?

ב. כלי הרכב לעולם לא ייפגשו?

ג. בנקודה A שני כלי הרכב באותו המקום, ולשניהם גם אותה המהירות?

ד. הנקודה A מציינת את הזמן, בו לשני כלי הרכב הייתה אותה המהירות?

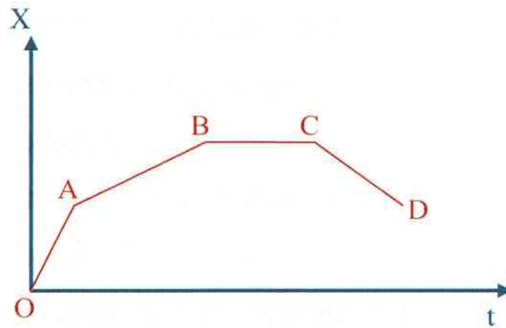
4) הגרף הבא מתאר את מיקומו של גוף. האם נכון ש:

א. מהירות הגוף בקטע AB קטנה מאשר בקטע OA ?

ב. בקטע BC הגוף נשאר באותו המקום?

ג. בקטע CD הגוף חוזר בכיוון נקודת מוצאו?

ד. כל התשובות נכונות?



5) הגרף הבא מתאר את מהירותו של גוף, הנע בקו ישר בתלות בזמן.

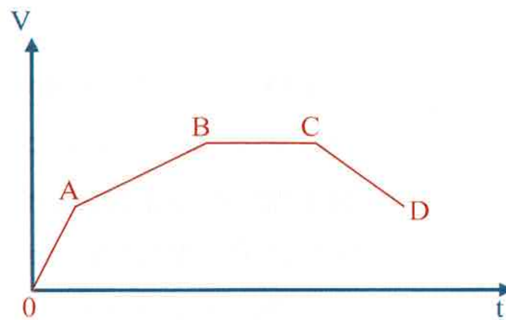
האם נכון ש:

א. תאוצתו בקטע AB גדולה מאשר בקטע OA?

ב. בקטע BC תאוצתו של הגוף קבועה?

ג. בקטע CD הגוף חוזר בכיוון נקודת מוצאו?

ד. כל התשובות אינן נכונות?



6) בתרשים מתוארים גרפים של מקום בתלות בזמן של שני אופנועים א' ו- ב'.

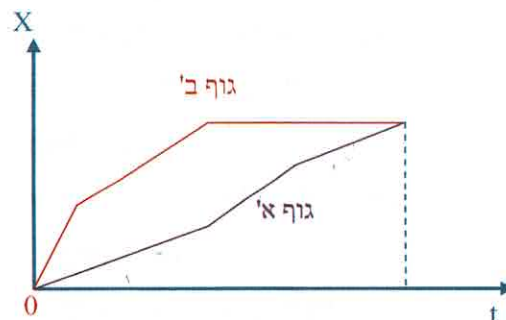
האם נכון, שמהירותו הממוצעת של אופנוע א':

א. הייתה שווה לזו של אופנוע ב'?

ב. גדולה מזו של אופנוע ב'?

ג. קטנה מזו של אופנוע ב'?

ד. לא ניתנת להשוואה לזו של ב'?



7) בתרשים מתוארים גרפים של מהירות כתלות בזמן של 2 אופנועים- א' ו- ב'.

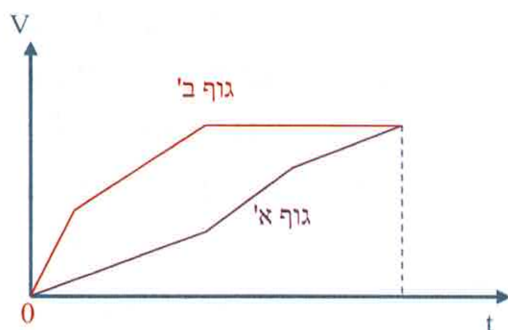
האם נכון, שמהירותו הממוצעת של אופנוע א':

א. הייתה שווה לזו של אופנוע ב'?

ב. גדולה מזו של אופנוע ב'?

ג. קטנה מזו של אופנוע ב'?

ד. לא ניתנת להשוואה לזו של ב'?



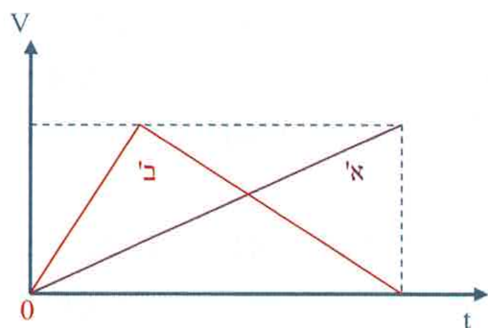
8) הגרפים בתרשים הבא מתארים את מהירותם של שני הולכי רגל א' ו- ב', הנעים על קו ישר. האם נכון, שהדרך שעובר הולך הרגל א':

א. שווה לזו שעובר ב'?

ב. גדולה מזו של ב'?

ג. קטנה מזו של ב'?

ד. לא ניתנת להשוואה לזו של ב'?



9) הגרף הבא מתאר את מהירותו של גוף, הנע בקו ישר בתלות בזמן.

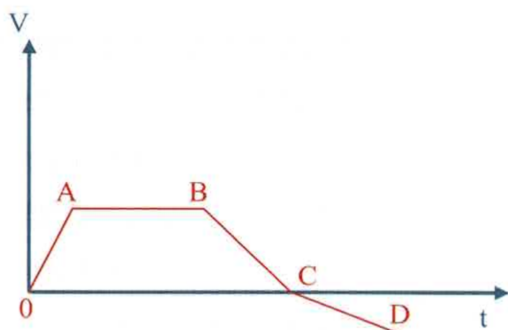
האם נכון ש:

א. תאוצתו בקטע AB גדולה מאשר בקטע OA?

ב. בקטע BC הגוף חוזר בכיוון נקודת מוצאו?

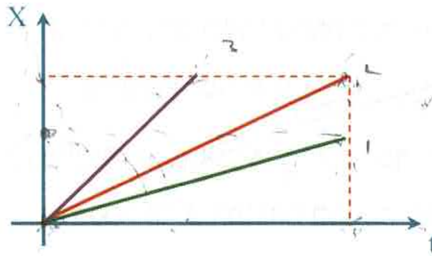
ג. בקטע CD הגוף חוזר בכיוון נקודת מוצאו?

ד. כל התשובות אינן נכונות?





תנועה



1) הגרפים הבאים מתארים את תנועתן של שלוש מכוניות הנעות במהירות קבועה:

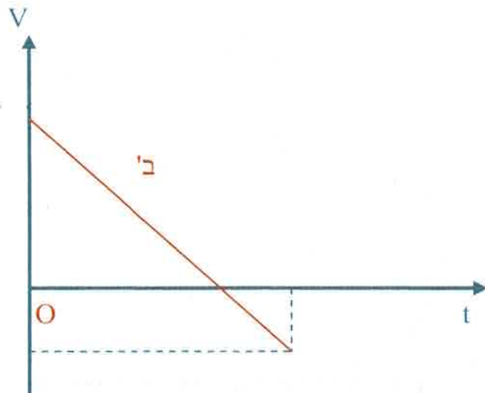
א. האם שיפועי הגרפים זהים?

ב. האם מהירויות המכוניות זהות?

ג. לאיזו מכונית מהירות גבוהה יותר? נמקו!

2) תנו דוגמה למצב, בו המהירות הממוצעת שווה למהירות הרגעית.

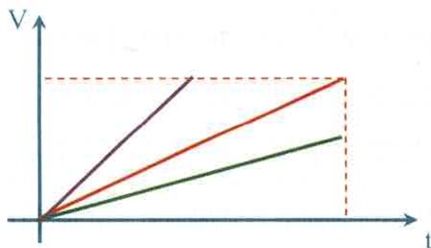
3) הגרף הבא מתאר את מהירותה של מכונית , הנעה ימינה:



א. האם המכונית נעצרת בשלב כלשהו של תנועתה? אם כן- מתי?

ב. האם המכונית התחילה לנוע שמאלה בשלב כלשהו של תנועתה? אם כן- האם חזרה לנקודת מוצאה? נמקו.

4) הגרפים הבאים מתארים את תנועתן של שלוש מכוניות הנעות בתאוצה קבועה:



א. תארו במילים את תנועת כל אחת מהמכוניות.

ב. עבור מרווחי זמן שווים, מה קורה למהירות של כל אחת מהמכוניות?

ג. לאיזו מכונית תאוצה גדולה יותר? נמקו.

ד. איזו מכונית עברה מרחק גדול יותר? נמקו.

5) א. הגדירו את המושגים הבאים: 1) דרך 2) העתק 3) מהירות ממוצעת.

ב. באיזו סוג תנועה הדרך וההעתק הם שווים?

6) א. למה שווה שיפוע הגרף: 1) ההעתק כפונקציה של הזמן. 2) המהירות כפונקציה של הזמן.

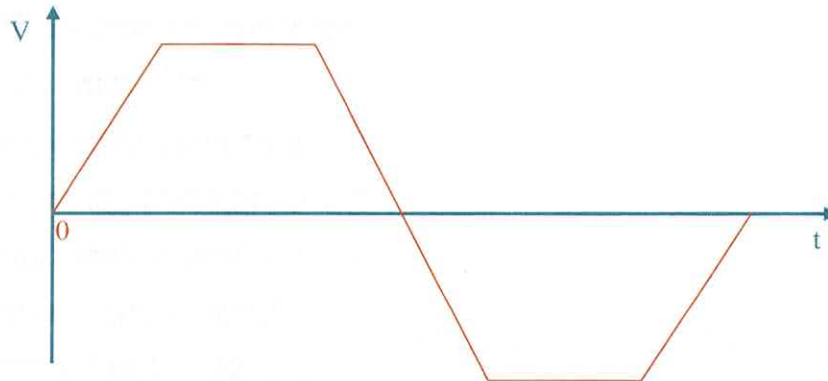
ב. למה שווה השטח מתחת לגרף 1) המהירות כפונקציה של הזמן. 2) התאוצה כפונקציה של הזמן.

7) סרטטו באופן איכותי גרף של מהירות כפונקציה של הזמן עבור המקרים הבאים:

א. רכבת הרים הנמצאת במנוחה מאיצה בתאוצה קבועה, ואח"כ נעה במהירות קבועה.

ב. ילד, המחליק על קרח ונמצא בתנועה במהירות קבועה, מאט בתאוצה קבועה עד לעצירתו.

8) הגרף הבא מתאר את תנועתו של רכבל המתחיל לנוע ימינה:



א. תארו במילים את תנועת הרכבל.

ב. האם הרכבל חזר לנקודת מוצאו? נמקו.

9) תאוצת אופנוע גדולה פי 3 מזו של מכונית. שניהם מתחילים לנוע יחד ממצב מנוחה.

פי כמה ארוך הזמן שלקח למכונית להגיע לאותה מהירות של האופנוע?

פי כמה ארוך הזמן שלקח למכונית לעבור אותו מרחק שעבר האופנוע?

10) שרטטו גרף מקורב של מהירות צנחן כפונקציה של הזמן.



חלקו את התנועה לשלושה שלבים:

1) לפני פתיחת המצנח 2) בזמן שהמצנח פתוח

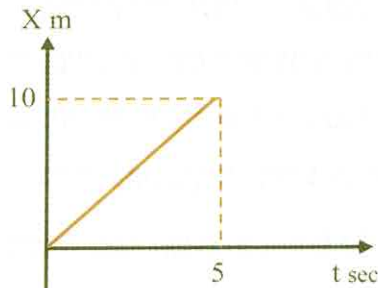
3) לפני הפגיעה בקרקע.

שאלות חישוב



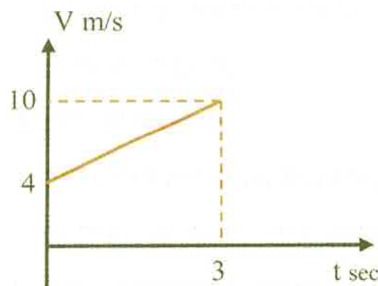
1. מכונית מגיעה ממנוחה למהירות 8 m/sec תוך 2 sec בתאוצה קבועה בקו ישר.
המכונית ממשיכה לאחר מכן להאיץ באותה התאוצה.
א. מהי תאוצת המכונית?
ב. מהי מהירות המכונית שנייה אחת לאחר תחילת התנועה?
ג. מהו ההעתק של המכונית בשתי השניות הראשונות של התנועה?
ד. תוך כמה זמן תגיע המכונית למהירות של 12 m/sec?
ה. תוך כמה זמן תגיע המכונית למרחק של 60 m מנקודת המוצא?
ו. מה תהיה מהירות המכונית כשתהיה 120 m מנקודת המוצא?

2. נתון גרף המתאר את המיקום של תנועת ילד
כפונקציה של הזמן:



א. תארו במילים את תנועת הילד.
ב. מהי מהירות הילד לאחר 2 sec?
ג. מהי מהירות הילד לאחר 3 sec?
ד. מהו מיקום הילד לאחר 3 sec?
ה. מהו מיקום הילד בתחילת מדידות זמן התנועה?
ו. כיצד נראה גרף המהירות כפונקציה של זמן?

3. מהירות של אדם נמדדת מנקודה מסוימת
הנקראת ראשית הצירים. נתון הגרף המתאר
את מהירות האדם כפונקציה של הזמן:



א. תארו במילים את תנועת האדם.
ב. מהי תאוצת האדם לאחר:
1) 2 sec 2) 3 sec?
ג. מהי מהירות האדם בתחילת מדידת הזמן התנועה?
ד. מהי מהירות האדם לאחר: 1) 2 sec 2) 3 sec?

ה.מהו מיקום האדם לאחר 3 sec?

ו. מהי המהירות הממוצעת בשלוש השניות הראשונות של התנועה?

ז. מהי המהירות הממוצעת בשנייה השלישית של התנועה?

ח. לאחר כמה זמן מתחילת התנועה יהיה השטח שמתחת לגרף המהירות כפונקציה של הזמן שווה ל-15 m?

4. מכונית המתחילה את תנועתה ממנוחה, מאיצה במשך 20 sec בתאוצה קבועה של $4m/sec^2$ לאחר מכן היא ממשיכה לנוע ללא תאוצה במשך 30 sec נוספים, ולבסוף מאיטה תוך 10 sec עד לעצירה.

א. מהי מהירות המכונית לאחר הקטע הראשון של התנועה?

ב. מהי תאוטת המכונית בקטע התנועה השלישי?

ג. מהו ההעתק הכללי של המכונית?

ד.כיצד נראה גרף התאוצה כפונקציה של הזמן?

ה.כיצד נראה גרף המהירות כפונקציה של הזמן?

ו. כיצד נראה גרף ההעתק כפונקציה של הזמן?

5. מכונית הנעה במהירות 72 km/h מתחילה לבלום בתאוצה קבועה ונעצרת כעבור 7.5 שניות. מהי תאוצתה, ואיזה מרחק היא עוברת מתחילת הבלימה ועד לעצירתה המלאה?

6. נהג מכונית הנעה במהירות 108 km/hr מבחין במכשול נייח במרחק 100 m ממנו. זמן התגובה של הנהג הוא 0.8 sec.

א. מהי התאוטה שתגרום למכונית להיעצר בדיוק לפני המכשול?





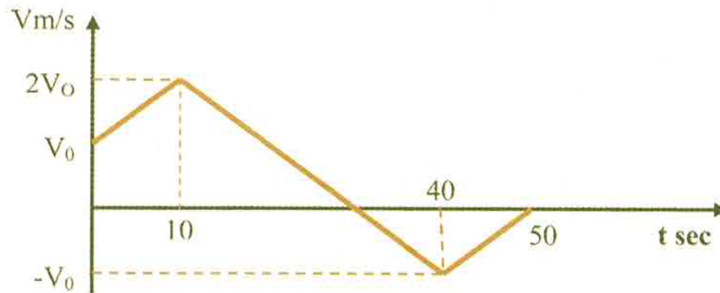
ב. מהו זמן ההאטה?

ג. כיצד נראה גרף התאוצה כפונקציה של הזמן מן הרגע, בו הבחין הנהג בסכנה ועד שנעצר?

ד. כיצד נראה גרף המהירות כפונקציה של הזמן, מן הרגע, בו הבחין הנהג בסכנה ועד שנעצר?

7. לפניך גרף המתאר את מהירותה של מכונית הנעה לאורך קו ישר משמאל לימין.

ברגע t=0 הגוף נמצא בנקודת הייחוס X=0 . כיוון ימין נבחר כחיובי.



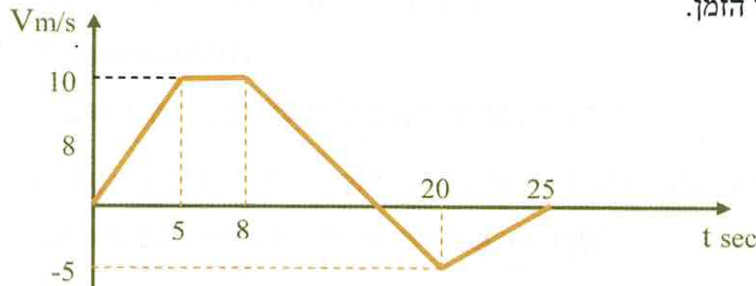
א. אם ידוע שב-10 השניות הראשונות המכונית עברה 150 m, מהי מהירותה ההתחלתית ?

ב. מהי תאוצת המכונית במשך 10 השניות הראשונות?

ג. כעבור כמה זמן מתחילת התנועה תגיע המכונית לנקודה הרחוקה ביותר מנקודת מוצאה?

ד. מה הייתה מהירותה הממוצעת של המכונית בין t=0 ל- t=50 sec?

8. ברגע t=0 גוף נע ימינה לאורך קו ישר. הגרף שלפניך מתאר את מהירות הגוף כפונקציה של הזמן.



א. תארו במילים את תנועת הגוף. (ציין את סוג התנועה ואת כיוונה)

ב. האם הגוף משנה את כיוון תנועתו? ציינו ונמקו.

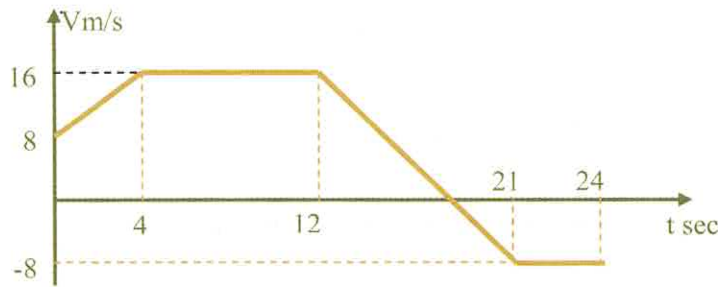
ג. סרטטו גרף המתאר את תאוצת הגוף כתלות בזמן מרגע t=0 עד t=25sec .

ד. חשבו את מקום הגוף בתום 8 שניות ראשונות לתנועתו.

ה. חשבו את המהירות הממוצעת במהלך 8 שניות ראשונות.

ו. חשבו את מקום הגוף לאחר 25 שניות.

9. הגרף שבתרשים מתאר את תנועתה של קרונית הנעה בקו ישר. בתחילת התנועה הקרונית נעה ימינה.



א. סרטטו גרף של התאוצה כפונקציה של הזמן.

ב. מתי תגיע הקרונית למרחק המכסימלי ימינה לנקודת ההתחלה?

ב. מהו המרחק המכסימלי, אליו הגיעה הקרונית ימינה לנקודת ההתחלה?

ג. מהי מהירותה הממוצעת ב- 24 השניות של התנועה?

10. אורך הקנה של רובה M16 הוא 0.5 מ',



ומהירות הלוע של הקליע

(כלומר– המהירות בה הוא יוצא מהקנה)

היא 1000 m/sec.

בהנחה שתאוצת הקליע בתוך הקנה קבועה,מהו ערכה?

11. קטנוע הנע בתאוצה קבועה עובר מרחק של 80 מ' בין שתי נקודות במשך 8 שניות . מהירותו בעוברו את הנקודה השנייה היא 20m/sec.

א . מהי תאוצתו?

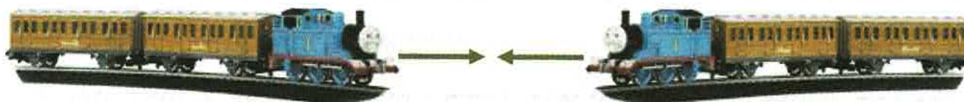
ב . מה מהירותו בעוברו את הנקודה הראשונה?

12. מכונית מאיצה ממנוחה בתאוצה קבועה של $3\ m/sec^2$ במשך 15 sec. אחר כך היא שיכה במהירות קבועה במשך זמן מסוים, ונעצרת לבסוף לאחר תאוטה במשך 12 sec. ההעתק של המכונית במהלך התנועה הוא 720 m . כמה זמן נעה המכונית במהירות קבועה?

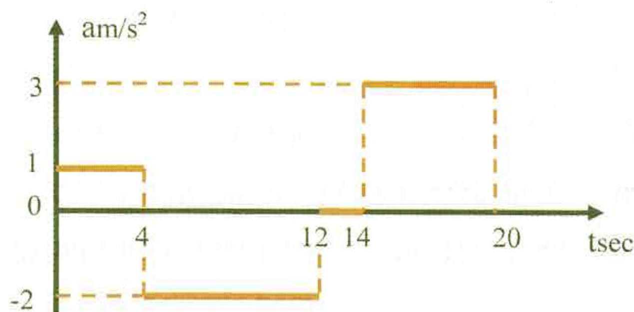
13. שני נהגי רכבות הנעות במהירות קבועה של 108 km/hr מגלים בו זמנית, כאשר הרכבות נמצאות במרחק של 900 m זו מזו, שהרכבות נמצאות על אותה מסילה ונעות זו לכיוונה של זו.

זמן התגובה של נהגי הקטרים הוא 0.8sec ותאוטת רכבת א' היא $5\ m/sec^2$.

מה צריכה להיות תאוטתה של רכבת ב' כדי שימנע אסון?



14. ברגע t=0 גוף מתחיל לנוע ימינה לאורך קו ישר . הגרף שלפניך מתאר את תאוצת הגוף כפונקציה של הזמן.



א. מה מייצג השטח שבין גרף התאוצה לבין ציר הזמן ?

ב. סרטטו גרף המתאר את מהירות הגוף מרגע t=0 עד רגע t=20sec.

האם הגוף משנה את כוון תנועתו? אם לא – נמקו. אם כן – ציינו מתי, ונמקו.

ג. האם במהלך תנועתו הגוף חוזר לנקודת המוצא (נקודה שממנה יצא ברגע t=0)?

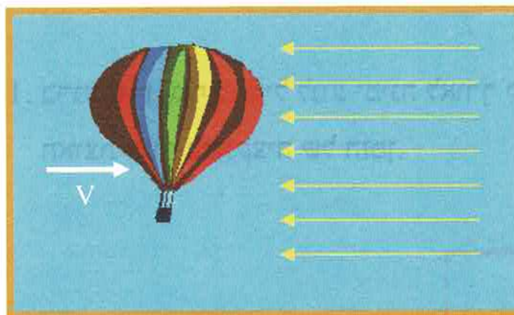
אם כן – באיזה רגע? אם לא- נמקו.

15. כדור פורח, הנע ימינה במסלול אופקי בקו ישר במהירות של $V=15\ m/sec$, נקלע לאזור בו נגרמת לו תאוצה של $a=2.5\ m/sec^2$ בכיוון מנוגד לכיוון תנועתו (ראה תרשים).

א. כעבור כמה זמן מרגע תחילת השפעת הרוח יתחיל הכדור לנוע בכיוון מנוגד לכיוון תנועתו המקורי ?

ב. כעבור כמה זמן מרגע תחילת השפעת הרוח יימצא הכדור הפורח באותה נקודה, שבה היה ברגע התחלת התאוצה ?

ג. ציר מקום X מוגדר כך, שכיוונו החיובי כלפי ימינה וראשיתו בנקודה בה החלה התאוצה . סרטטו גרפים המתארים:



1) את מקום הכדור הפורח כפונקציה של הזמן מרגע $t=0$ עד לרגע, בו הוא נימצא שוב בנקודה שבה החלה השפעת הרוח.

2) את מהירות הכדור הפורח כפונקציה של הזמן מרגע $t=0$ עד לרגע חזרתו לנקודה בה החלה השפעת הרוח.

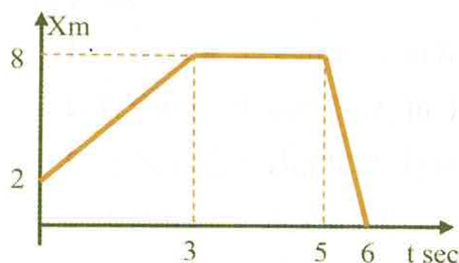
3) את תאוצת הכדור פורח כפונקציה של הזמן מרגע $t=0$ עד לרגע חזרתו לנקודה, בה החלה השפעת הרוח.

ד. אדם טס במטוס ימינה במהירות קבועה של $10\ m/sec$.

1) כעבור כמה זמן מרגע, שבו החלה השפעת הרוח, מתאפסת מהירותו של הכדור פורח מנקודת ראותו של האדם במטוס ?

2) סרטטו גרף של מהירות הכדור הפורח כפונקציה של הזמן, כפי שהיא נצפית מנקודת ראותו של האדם במטוס, מהרגע בו החלה השפעת הרוח ועד לרגע חזרתו למקומו ההתחלתי.

16. נתון גרף המתאר את מיקומו של גוף כפונקציה של הזמן .



א. תארו במילים כל אחד משלבי התנועה.

ב. מהי המהירות בכל אחד מהשלבים?

ג. מהו המיקום לאחר:

1) 2 sec 2) 4 sec 3) 6 sec?

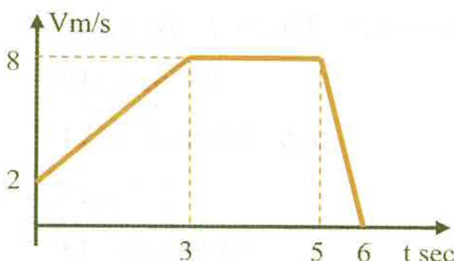
ד. מהי המהירות לאחר:

1) 2sec 2) 4 sec 3) 5.5 sec?

ה. מהי המהירות הממוצעת בקטעי התנועה:

1. 0-2 sec 2. 0-4 sec 3. 0-6 sec

17. נתון גרף המתאר מהירות מכונית כפונקציה של הזמן.



א. תארו במילים כל אחד משלבי התנועה.

ב. מהי התאוצה בכל אחד מהשלבים?

ג. מהי מהירות המכונית לאחר:

1) 2 sec 2) 4 sec 3) 6sec?

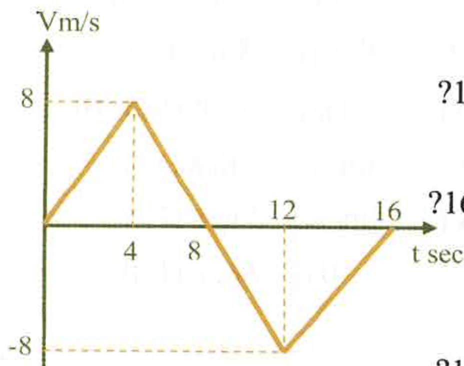
ד. מהו מיקום המכונית ($X_0 = 0$) לאחר:

1) 2 sec 2) 4 sec 3) 5.5 sec?

ה. מהי המהירות הממוצעת בקטעי התנועה:

1) 0-2 sec 2) 0-4 sec 3) 0-6 sec

18. נתון גרף המתאר את מהירותו של אדם כפונקציה של הזמן.



א. תארו במילים כל אחד משלבי התנועה.

ב. מהו המיקום של האדם ($X_0 = 0$) לאחר:

1) 2 sec 2) 4 sec 3) 10 sec 4) 16 sec?

ג. מהי המהירות של האדם לאחר:

1) 2 sec 2) 4 sec 3) 10 sec 4) 16 sec?

ד. מהי המהירות הממוצעת של האדם

מתחילת הריצה ועד:

1) 2 sec 2) 4sec 3) 10sec 4) 16 sec?

ה. מהי המהירות הממוצעת בין השניות: 1) 2 sec– 6 sec 2) 6 sec-10 sec

תשובות

1. א. $4\ m/s^2$ ב. 4 m/s ג. 8 m ד. 3 s ה. 5.47 s ו. 30.9 m/s

2. ב. 2 m/s ג. 2 m/s ד. 6 m ה. 0

3. ב. $2\ m/s^2$ ג. 4 m/s ד. 1) 8 m/s 2) 10 m/s ה. 21 m ו. 7 m/s

ז. 9 m/s ח. 2.358 s

4. א. 80 m/s ב. $-8\ m/s^2$ ג. 3600 m

5. $a=-2.67\ m/s^2$, $x=75\ m$

6. א. $-5.92\ m/s^2$ ב. 5.06 s

7. א. 10 m/s ב. $1\ m/s^2$ ג. 30 s ד. 5 m/s

8. ב. כן ד. 55 m ה. 6.875 m/s ו. 72.5 m

9. ב. 18 s ג. 224 m ד. 7.83 m/s

10. $10^6\ m/s^2$

11. א. $2.5\ m/s^2$ ב. 0

12. 2.5 s

13. $-0.59\ m/s^2$

14. א.שינוי המהירות ב.כן , 18s, 6s ג. כן, כעבור 9.464s

15. א. 6 s ב. 12 s ד. 1) 2 s

16. ב. 1) 2 m/s 2) 0 3) -8 m/s ג. 1) 6 m 2) 8 m 3) 0

ד. 1) 2 m/s 2) 0 3) -8m/s ה. 1) 2 m/s 2) 1.5 m/s 3) -0.33 m/s

17. ב. 1) $2\ m/s^2$ 2) 0 3) $-8\ m/s^2$ ג. 1) 2 m/s 2) 8 m/s 3) 0

ד. 1) 8 m 2) 23 m 3) 34 m ה. 1) 4 m/s 2) 5.75 m/s 3) 5.83 m/s

18. ב. 1) 4 m 2) 16 m 3) 28 m 4) 0

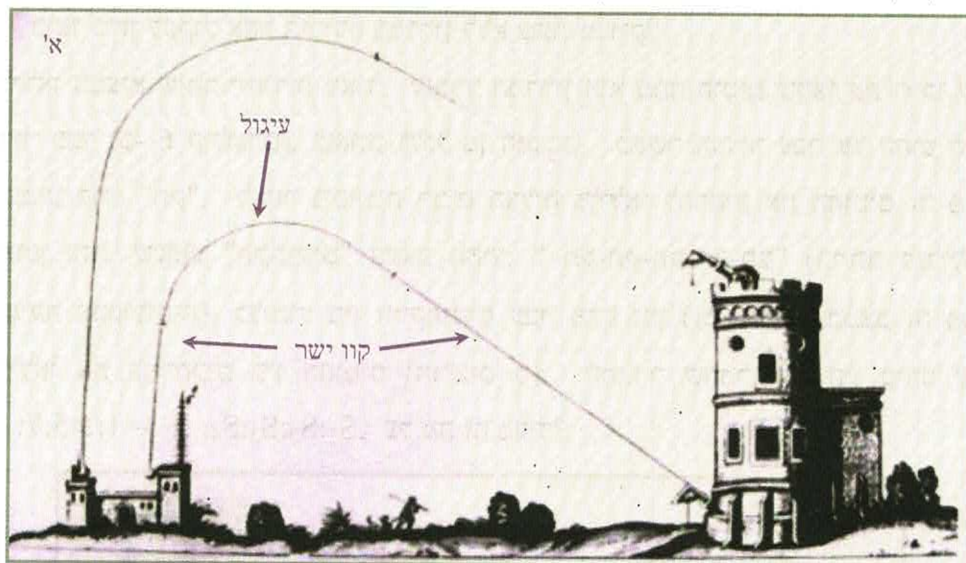
ג. 1) 4 m/s 2) 8m/s 3) -4 m/s 4) 0

ד. 1) 2 m/s 2) 4m/s 3) 2.8 m/s 4) 0

ה. 1) 6m/s 2) 0

הכרנו את התנועה במקרים הפשוטים שלה: תנועה שוות מהירות (או שוות קצב) ותנועה שוות תאוצה, שתיהן בקו ישר. אך מדוע ללמד דווקא אותן? התשובה לכך נעוצה בעובדה שתנועות רבות אחרות ניתן להציג כמורכבות משני סוגים אלה. אך, האם גם תנועה במסלול עקום ניתן להרכיב מתנועות בקו ישר?

לפני כ- 2500 שנה חשבו המדענים ביוון שהתנועה במעגל והתנועה בקו ישר הן כמו "אטומים" של תנועה. בתקופת ימי הביניים ראו המדענים כל תנועה כמורכבת מתנועה במעגל ומתנועה בקו ישר. כך הבינו, למשל, את מסלול תנועתה של אבן הנזרקת בזווית לאופק: קו ישר – עיגול – קו ישר (תרשים א').



כבר במאה ה- 17 התברר, כי ניתן להציג את התנועה הזו באופן אחר. היה זה גילויו של גלילאו– מדען איטלקי דגול, אשר ייסד את המכניקה המודרנית. כדי להבין את הסברו לתנועת הגוף, הנזרק בזווית, נבין תחילה איך הסביר גלילאו את תנועתו של גוף, הנופל אנכית לקרקע.


גלילאו גליליי
1564-1642

תנועת גופים בנפילה חופשית

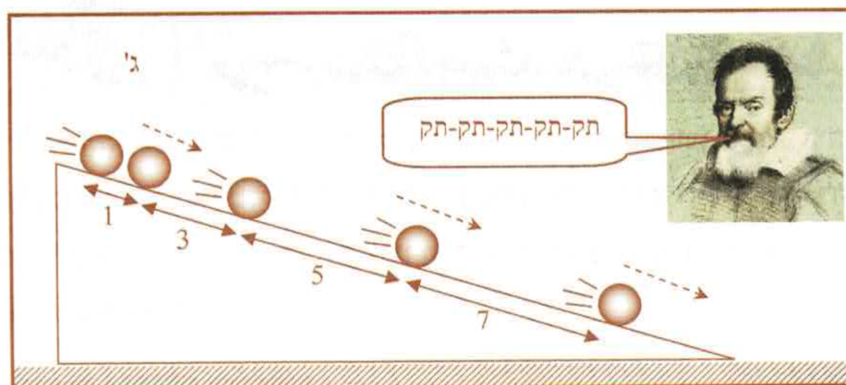
לא פשוט לעקוב אחר גוף נופל: נפילה של גוף כבד (כמו אבן) היא מהירה מכדי לראות את הפרטים, ונפילה של גוף קל (כמו דף נייר) אינה דומה כלל לנפילת האבן. במאה ה-17 הבין גלילאו, איך ללמוד

על הנפילה של גוף כבד, ומדוע גוף קל אינו נופל באופן דומה לגוף כבד. גלילאו הבין, שכאשר גוף מתגלגל לאורך המדרון, תנועתו בעצם היא נפילה המוסטת על ידי המדרון. המדרון מעכב את הגוף, אך אינו משנה את אופי תנועתו.



כיצד ניתן לעקוב אחר הירידה במדרון ללא שעון מדויק?

גלילאו המציא שיטה ייחודית מאוד. לאורך המדרון הוא מתח חוטים שחצו את דרכו של כדור כבד (כ- 6 קילוגרם), שאותו גלגל מן המדרון. כאשר הכדור עבר על החוט הוא השמיע קול: "תק". לאחר ניסיונות רבים הצליח גלילאו להרחיק את החוטים זה מזה באופן כזה, ששמע "תקתוקים" בקצב אחיד: " תק-תק-תק-תק-תק" (הייתה לגלילאו שמיעה אבסולוטית), כלומר: בין התקתוקים עבר פרק זמן (Δt) זהה. במצב זה מדד גלילאו את המרחקים בין החוטים (תרשים ג'). התברר שהמרחקים היו ביחס של $S_1:S_2:S_3:S_4: \ldots = 1:3:5:7: \ldots$. על מה זה מעיד?



כדי לענות על שאלה זו נזכור, שגוף הנע בתנועה שוות התאוצה (a) ומתחיל לנוע ממצב מנוחה ($V_0=0$), לאחר זמן t עובר מרחק L:

$$L = \frac{1}{2}at^2 \qquad (1)$$

התקתוקים אותם שמע גלילאו תוך כדי הירידה של הכדור תאמו לזמנים t_0, t_1, t_2, t_3, t_4... כאלה ש:

$$t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3 = \quad = \Delta t$$

נחשב את המרחקים שעובר הגוף עד הזמנים t_0, t_1, t_2, t_3, t_4..., נסמן אותם על ידי: L_1, L_2, L_3, L_4., L_5.

לפי ביטוי (1) נקבל:

$$\begin{aligned}
L_0(t_0) &= 0 \\
L_1(t_1) &= \frac{1}{2}a\cdot(\Delta t)^2 \\
L_2(t_2) &= \frac{1}{2}a\cdot(2\,\Delta t)^2 = \frac{1}{2}a\cdot 4(\Delta t)^2 \\
L_3(t_3) &= \frac{1}{2}a\cdot(3\,\Delta t)^2 = \frac{1}{2}a\cdot 9(\Delta t)^2 \\
L_4(t_4) &= \frac{1}{2}a\cdot(4\,\Delta t)^2 = \frac{1}{2}a\cdot 16(\Delta t)^2 \\
L_5(t_5) &= \frac{1}{2}a\cdot(5\,\Delta t)^2 = \frac{1}{2}a\cdot 25(\Delta t)^2
\end{aligned} \qquad (2)$$

המרחקים בין החוטים S_1, S_2, S_3, S_4., S_5 התאימו להפרשי המרחקים, אותם סימנו ב-L:

$$S_1 = L_1 - L_0 = \frac{1}{2}a\cdot(\Delta t)^2$$

$$\begin{aligned}
S_2 &= L_2 - L_1 = \frac{1}{2}a\cdot 3(\Delta t)^2 \\
S_3 &= L_3 - L_2 = \frac{1}{2}a\cdot 5(\Delta t)^2 \\
S_4 &= L_4 - L_3 = \frac{1}{2}a\cdot 7(\Delta t)^2 \\
S_5 &= L_5 - L_4 = \frac{1}{2}a\cdot 9(\Delta t)^2
\end{aligned} \qquad (3)$$

מכאן מקבלים עבור היחס בין מרחקי S:

$$S_1 : S_2 : S_3 : S_4 : S_5 = 1:3:5:7:9 \qquad (4)$$

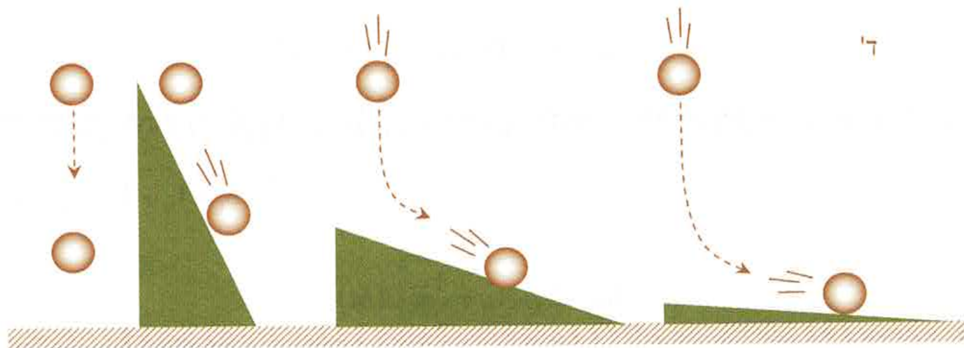
יחס זה בדיוק קיבל גלילאו בין המרחקים שבין החוטים. יחס זה העיד על כך, שהתנועה של הכדור המתגלגל במדרון מטה היא תנועה שוות תאוצה. מכאן הסיק גלילאו שנפילת הגופים מהגובה אל הקרקע גם היא תנועה שוות תאוצה.



הוכחת גלילאו שנפילת הגופים מהגובה אל הקרקע היא תנועה שוות תאוצה היוותה הישג אדיר של המדע.

תנועה בליסטית

בניסויים במדרון צפה גלילאו, שהתאוצה של הירידה במדרון יורדת יחד עם זוויות ההגבהה של המדרון, עד שהיא מתאפסת כליל בתנועה במישור האופקי (תרשים ד'). כלומר: תנועת גוף בעל מהירות במישור אופקי נמשכת ללא שינוי במהירות. זוהי תנועה שוות קצב.





התנועה האופקית של גוף בעל מהירות על מישור חלק היא תנועה קצובה

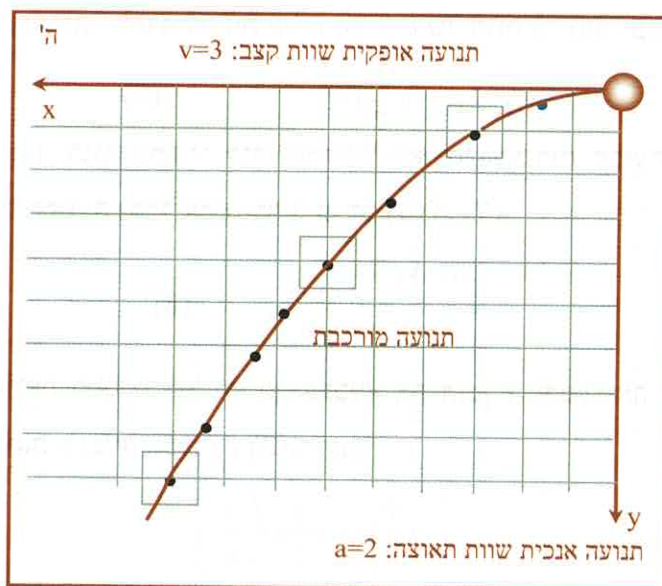
עתה הציע גלילאו לראות את תנועתו של גוף הנזרק כחיבור בו שתי תנועות: תנועה שוות תאוצה בכיוון האנכי ותנועה שוות קצב בכיוון האופקי. נראה מה תהיה התוצאה של שתי התנועות האלו.

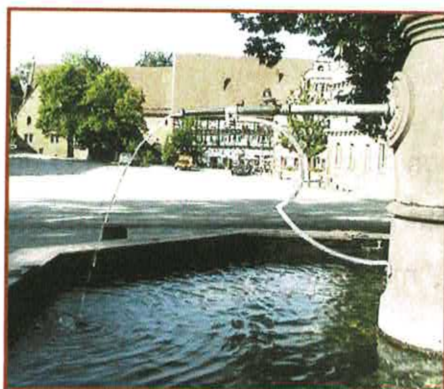
לשם כך ניקח מקרה בו הגוף ניזרק ממש אופקית. נגדיר את הכיוונים לתיאור התנועה כפי שהוצג בתרשים ה'. במקרה זה הביטוי עבור המיקום האופקי (נסמן ציר אופקי ב-x) יהיה, כפי שנלמד:

$$x = v_x \cdot t \qquad (4)$$

ובכיוון האנכי תהיה זו, כאמור, נפילה ללא מהירות התחלתית, ולכן המיקום לפי הציר האנכי y יינתן על ידי הביטוי:

$$y = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \qquad (5)$$




תנועה בליסטית של מים היוצרים מסלול פרבולי התואם לזריקה אופקית של גוף


תרשים מספרו של גלילאו משנת 1634

תרשים ה', למעשה, מייצג את מסלול הגוף הנופל. ניתן לקבל את הביטוי עבורו על סמך ביטויים (4) ו- (5). אם נבטא זמן t מתוך (4) ונציב אותו בביטוי (5) נקבל:

$$y=\frac{1}{2}a\cdot\frac{x^2}{v_x^2}=\frac{1}{2}\cdot\frac{a}{v_x^2}\cdot x^2 \quad \Leftarrow \quad t=\frac{x}{v_x} \qquad (6)$$

אנו מזהים בביטוי זה פרבולה בצורתה הפשוטה ביותר: $y=A\cdot x^2$ זהו המסלול של גוף, הנזרק במקביל לאופק.

במקרה הכללי יותר, כאשר הגוף נזרק בזווית לאופק, ניתן להבין שלאורך הציר האנכי תתרחש בהתחלה תנועה עם ירידה בגודל המהירות האנכית, מערך v_y התחלתי ועד התאפסות המהירות האנכית, שמתרחשת בשיא הגובה. לאחר מכן תתרחש ירידה במהירות ההולכת וגדלה. למדנו גם את תלות המיקום של הגוף (הגובה) במקרה זה:

$$y=v_y\cdot t+\frac{1}{2}a\cdot t^2 \qquad (7)$$

במשך כל הזמן הזה הגוף ממשיך לנוע במקביל לאופק במהירות קבועה. כלומר את התיאור המלא של התנועה נקבל אם נחבר ביטויים (4) ו- (7):

$$\begin{cases} x=v_x\cdot t \\ y=v_y\cdot t+\frac{1}{2}a\cdot t^2 \end{cases} \qquad (8)$$

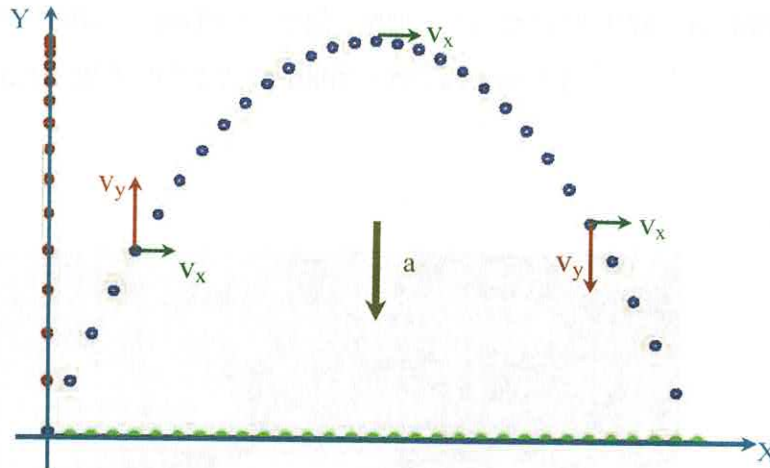
שוב נעבור למשוואת המסלול על ידי כך שנבטא את הזמן t מהמשוואה הראשונה (6) ונציב אותו במשוואה השנייה במערכת (8). נקבל:

$$y=\frac{v_y}{v_x}\cdot x+\frac{1}{2}a\cdot\left(\frac{x}{v_x}\right)^2$$

או:

$$y=\frac{v_y}{v_x}\cdot x+\frac{1}{2}\frac{a}{v_x^2}\cdot x^2 \qquad (9)$$

תוצאה (9) היא ביטוי כללי לפרבולה מסוג: $y=A\cdot x+B\cdot x^2$. פרבולה זו עוברת דרך ראשית הצירים, כי קבענו את מקום הזריקה כמקום x=0, y=0. מסלול זה מתואר בתרשים ו'. זו היא התנועה "הבליסטית", כלומר תנועה של גוף הנזרק במהירות כלשהי בזווית לאופק.



כפי שרואים, עבור תנועה זו התקבל קו מסלול עקום הנוצר משתי תנועות בקו ישר,התנועה האופקית והתנועה האנכית, וכך הסתדרנו ללא התנועה במעגל, כפי שחשבו המדענים בימי הביניים (תרשים א').

מדוע בכל אופן שונה המסלול שבתרשים א' מהצורה של פרבולה? הרי האנשים ציירו את מה שראו בניסיון החיים שלהם? התשובה נוגעת להתנגדות האוויר אותה לא לקחנו בחשבון (כפי שגם עשה גלילאו). חיכוך הגוף עם האוויר גורם לכך, שהמסלול האמיתי סוטה מהצורה הפרבולית, ונעשה דומה לזה, שמופיע בתרשים א'. הסטייה היא גדולה יותר עבור הגופים הקלים יותר. את החישוב המדויק יותר של המסלול בזריקה אופקית ביצע לראשונה ניוטון בשנת 1687.

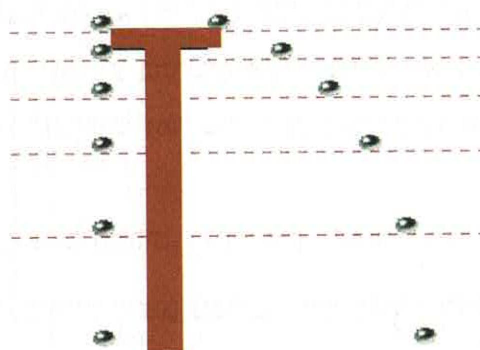
גלילאו אף הצליח למדוד את התאוצה, בה נופלים הגופים, וקיבל ערך השקול לגודל של $9.8\ \frac{m}{sec^2}$. יתירה מזאת, לגלילאו התברר, שגופים שונים נופלים בערך באותה תאוצה. תאוצה זו קיבלה סימון מיוחד:

$$g = 9.8\frac{m}{sec^2}$$

על סמך ניסויים עם גופים שונים הגיע גלילאו למסקנה, שהשינויים בתאוצת הנפילה אצל הגופים השונים מקורם בהתנגדות השונה של האוויר בזמן הנפילה. כלומר: אם נסלק את האוויר מהסביבה, ייפלו הגופים אל הקרקע באותה תאוצה. תוצאה זו סתרה את התיאוריה של אריסטו, לפיה גופים כבדים נופלים "מהר יותר". למרות שגלילאו מצא

שגיאה מוכחת התיאוריה של אריסטו, הוא לא יכול היה להסביר את העובדה, שכל הגופים נופלים באותה תאוצה. עובדה זו קיבלה הסבר רק במסגרת התאוריה החדשה של המכניקה, שנבנתה על ידי אייזק ניוטון מאוחר יותר, במאה ה-17.





זריקה אופקית ונפילה חופשית



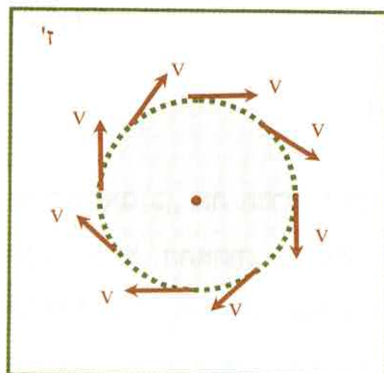
זריקה אנכית



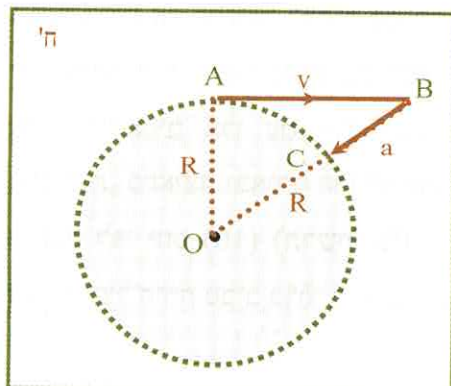

אייזק ניוטון
1727-1642

נעבור עתה לתנועה המעגלית, קודש הקודשים של המדע בתקופה העתיקה. התנועה המעגלית נתפסה כבסיסית ביותר ונצחית בטבע הודות לעובדה, שכך נעו, לדעת הקדמונים, הכוכבים בשמים. תפיסה זו הייתה מושרשת אצל האדם, ובה נקטו לאונרדו, קופרניקוס ואף גלילאו.

המיתוס נשבר במאה ה-17 על ידי ניוטון. עבור ניוטון, התנועה הבסיסית הייתה אחת: התנועה האחידה בקו ישר. לגבי התנועה המעגלית טען ניוטון, שהיא נוצרת כחיבור של שתי תנועות, שתיהן בקו ישר. למעשה זהו החיבור שהציע גלילאו עבור התנועה הבליסטית: תנועה שוות מהירות יחד עם תנועה שוות תאוצה, אך הגישה והמינון בחיבור היו שונים.



תחילה הבין ניוטון, שהתנועה המעגלית היא תנועה עם שינוי כיוון בקצב קבוע. ניתן לתאר תנועה זו כמורכבת מתנועה קדימה ומשינוי כיוון (תרשים ז'). תיאור זה לא היה טוב דיו כי לניוטון לא היה ברור איזו תנועה תציג את השינוי בכיוון. לשם ייצוג זה הציע ניוטון לראות את התנועה במעגל כמתקבלת בשני שלבים. בשלב הראשון הגוף נע ישר בכיוון המשיק למעגל במהירות v (תרשים ח'). בפרק הזמן Δt יעבור הגוף את המרחק $AB = v \cdot \Delta t$, ויתרחק מן המעגל. בשלב השני, ייפול הגוף בתנועה שוות תאוצה בכיוון המרכז O (BC) , ויחזור אל המסלול המעגלי.



את הנפילה לאורך BC בתנועה שוות תאוצה ניתן לבטא על ידי הביטוי:

$$BC = \frac{1}{2} a \cdot (\Delta t)^2$$

משולש OAB הוא משולש ישר זווית ולכן נוכל לרשום על פי משפט פיתגורס:

$$(OA)^2 + (AB)^2 = (OB)^2$$

נציב את הביטויים של AB ו-OB ונקבל:

$$R^2 + (v \cdot \Delta t)^2 = \left[\frac{1}{2} a \cdot (\Delta t)^2 + R\right]^2$$

או, אם נפתח את הסוגריים:

$$R^2 + (v \cdot \Delta t)^2 = \frac{1}{4} a^2 \cdot (\Delta t)^4 + a \cdot (\Delta t)^2 R + R^2$$

בביטוי זה נזניח את האיבר הכולל את $(\Delta t)^4$ מפני שמדובר בפרקי זמן קצרים מאוד. נקבל:

$$(v \cdot \Delta t)^2 = a \cdot (\Delta t)^2 R$$

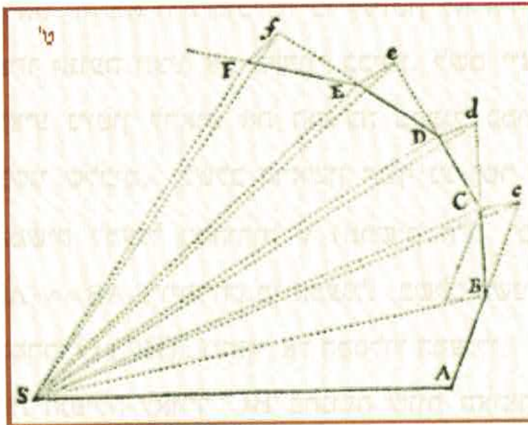
ובסופו של דבר נקבל ביטוי עבור התאוצה a:

$$a = \frac{v^2}{R}$$

תאוצה זו מכוונת אל מרכז המעגל, ולכן היא נקראת **תאוצה צנטריפטאלית**, ("מכוונת אל המרכז").

$$a_{c.p.} = \frac{v^2}{R} \qquad (10)$$

קיבלנו, אם כן, את הדרישה המדויקת עבור גודל התאוצה. זאת משום שנפילה של הגוף אל המרכז צריכה להתבצע בדיוק באותו פרק זמן (Δt), והיא צריכה להחזיר את הגוף אל המסלול המעגלי.



תרשים של ניוטון משנת 1687 בו הוא מסביר את טיבה של התנועה במעגל

ניוטון דמיין את התנועה במעגל כשורה של התרחקויות והתקרבויות של הגוף, אשר מתואמים אלו עם אלו בגודל המהירות, בתאוצה ובאורך הרדיוס של המעגל לפי יחס (10) (תרשים ט'). לתוצאה זו היה זקוק ניוטון על מנת להסביר את תנועתו של הירח סביב כדור הארץ, את ותנועתם של כוכבי הלכת סביב השמש.

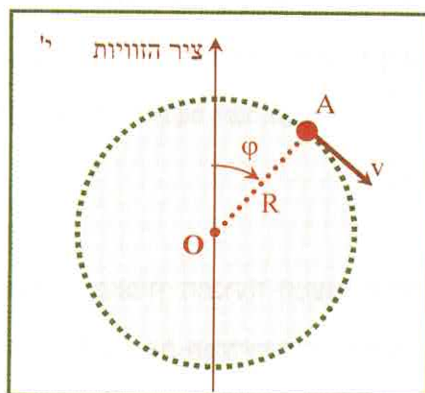


כפי שניוטון הבין לראשונה בהקשר לירח, כל גוף הנע בתנועה מעגלית **נופל** כלפי מרכז הסיבוב ובו זמנית מתרחק ממנו, כך שהוא נשאר במרחק קבוע ממרכז הסיבוב.

גם כל הלוויינים המלאכותיים, הסובבים את כדור הארץ, נופלים אליו ומתרחקים ממנו בו זמנית.

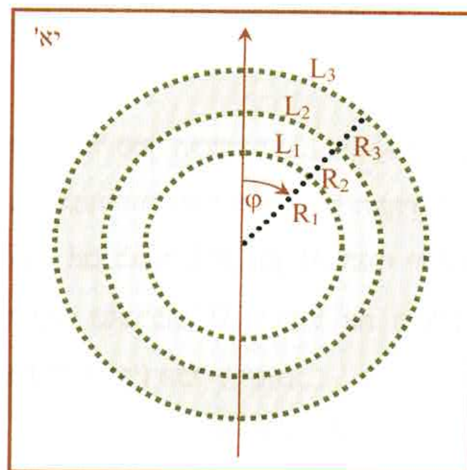


אפיון התנועה המעגלית



למרות כל הנאמר, תנועה מעגלית היא מיוחדת והיא שונה מתנועה בקו ישר. תוך כדי התנועה משתנה כיוונה, אך הגוף נשאר במרחק קבוע ממרכז המעגל. לכן טבעי, שאנו זקוקים לאפיונים חדשים לתיאור התנועה. הגורם החשוב, יחד עם רדיוס המעגל, הוא הזווית φ, הנוצרת בין הרדיוס אל הגוף וציר מסוים, אותו אנו בוחרים לפי הנוחיות (תרשים י').

די לדעת את R ואת φ כדי לדעת את מיקומו של הגוף A , שנע במסלול מעגלי.



את הזווית נאפיין על ידי יחידה מיוחדת המכונה רדיאן. רדיאן אינה מידה כמו מטר ושנייה. רדיאן הוא היחס בין אורך הקשת לבין אורך הרדיוס במעגל (תרשים יא'). יחס זה הוא כמידת הזווית עליה נשענת הקשת:

$$\varphi = \frac{L}{R} \qquad (11)$$

מוצדק למדוד כך את גודל הזווית, משום שאם נשנה את הרדיוס R של המעגל, הקשת המתאימה לאותה הזווית תגדל באותו היחס (שטחים דומים):

$$\varphi = \frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2} = \frac{L_3}{R_3} \qquad (12)$$

נקשר בין הרדיאן לבין הזווית במעלות, יחידה המוכרת מלימודים קודמים. ניקח זווית פתיחה של $360°$, לזווית זו מתאימה קשת L באורך של היקף המעגל, שכידוע שווה ל- $2\pi R$, כלומר לפי הגדרה (11) המידה של זווית הפתיחה היא:

$$\varphi_o = \frac{2\pi R}{R} = 2\pi$$

באותו אופן ניתן לקבוע את מידת הזוויות המוכרות האחרות, כגון:

$$180° \Rightarrow \pi;\ \ 90° \Rightarrow \pi/2;\ \ 60° \Rightarrow \pi/3;\ \ 45° \Rightarrow \pi/4;\ \ 30° \Rightarrow \pi/6$$

היתרון במדידת זוויות ברדיאנים הוא קלות החישובים. למשל גודל הקשת ניתן על סמך (11) על ידי קשר ישר ופשוט:

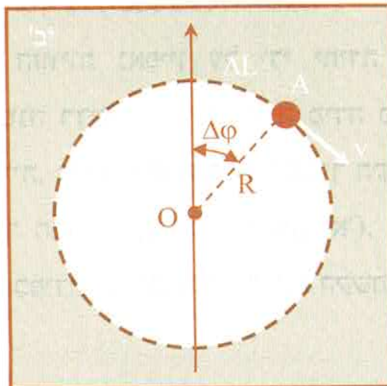
$$L = \varphi \cdot R \qquad (13)$$

נמשיך באפיון התנועה המעגלית בקביעת מהירות התנועה. בדומה למהירות הקווית v ניתן לאפיין את **המהירות הזוויתית** ω של הגוף על ידי קצב שינוי הזווית בזמן:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (14)$$

עתה, על סמך הקשרים (13) ו- (14) נוכל לקשר בין המהירות הקווית v לבין המהירות הזוויתית ω. אם לאחר פרק זמן Δt הגוף יתקדם לאורך קשת, שאורכה ΔL ויגדיל את הזווית ב- Δφ (תרשים יב') נוכל לרשום:

$$\Delta L = \Delta\varphi \cdot R$$



ולאחר החלוקה בפרק הזמן Δt לקבל:

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\cdot R$$

או:

$$v = \omega \cdot R \qquad (15)$$



קשר זה בין המהירות הזוויתית לבין המהירות הקווית של גוף, הנע במסלול מעגלי, הוא קשר חשוב מאוד, ויש לו שימוש רב בנושאים שונים בפיזיקה.

נציין גורם אפיון חשוב נוסף: **זמן המחזור** T. זהו הזמן הדרוש לגוף להשלים הקפה אחת במסלול מעגלי. ניתן לקשר את זמן המחזור עם יתר האפיונים. כך במשך זמן המחזור $(\Delta t = T)$ הגוף משלים זווית 2π , כלומר: $\Delta\varphi = 2\pi$. לכן לפי ההגדרה של המהירות הזוויתית (14) מקבלים:

$$\frac{2\pi}{T} = \omega \qquad (16)$$

מהגדרת המהירות הקווית נוכל גם לקשר בין זמן המחזור T ובין המהירות הקווית לאורך המסלול. היות שתוך זמן מחזור T הגוף עובר דרך השווה להיקף המעגל, $2\pi R$, נקבל עבור המהירות הקווית:

$$\frac{2\pi R}{T} = v \qquad (17)$$

הגורם האחרון לאפיון התנועה המעגלית הוא **המהירות הסיבובית**. זהו קצב הסיבובים או מספר הסיבובים, שמבצע הגוף ביחידת הזמן.

אם זמן המחזור (אורך הזמן של סיבוב אחד) הוא T, אזי מספר הסיבובים ביחידת זמן הוא:

$$f = \frac{1}{T} \qquad (18)$$

כאן סימנו את המהירות הסיבובית ב- f. לדוגמה, אם גוף המסתובב מבצע סיבוב אחד בעשירית שנייה, (T=0.1 sec) אזי המהירות הסיבובית שלו f היא:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.1\sec} = 10\frac{1}{\sec}$$

ניתן לראות שהמהירות הזוויתית ω והמהירות הסיבובית f קשורים, כפי שרואים מתוך הביטויים (16) ו-(18):

$$2\pi \cdot f = \omega \qquad (19)$$

נציין גם, *שהמהירות הזוויתית* ω ו**המהירות הסיבובית** f מכונות גם **תדירות הזוויתית** ו**התדירות הסיבובית** בהתאמה. שתי התדירויות קשורות על ידי ביטוי (19).

משתמשים במונחים שונים עבור מצבים שונים. למשל, כאשר מאפיינים את מהירות המנוע, משתמשים במונח "מהירות הסיבוב" ובמונח "התדירות הסיבובית" (או "המהירות הסיבובית"), ומשתמשים בדרך כלל ביחידות $\frac{1}{\text{דקה}}$. (מהירות המנוע במכונית היא בסביבות $3000\frac{1}{\text{דקה}}$).

כאשר מדברים על תנודות במעגל החשמלי, משתמשים ביחידות $\frac{1}{\text{שנייה}}$ ובמונח התדירות הסיבובית. בתיאור של תנודות מגדירים גם יחידה חדשה עבור התדירות:

$$1\,\text{Hertz} = 1\frac{1}{\sec}$$

למשל, במערכת החשמל התנודות הם בתדירות סיבובית של f=50Hz.

מה למדנו בפרק זה?

1. מהתנועות בקו ישר ניתן להרכיב את כל התנועות במסלול עקום. לשם כך צריך לחבר תנועות בכיוונים שונים.

2. התנועה הבליסטית – התנועה של גוף הנזרק בזווית לאופק – מתקבלת כתוצאה מחיבור של תנועה שוות קצב (מהירות קבועה) בכיוון האופקי עם תנועה שוות תאוצה בכיוון אנכי לקרקע.

3. המסלול של תנועה בליסטית הוא פרבולה, והתאוצה של גוף הנזרק היא בכיוון הקרקע.

4. תנועה מעגלית ניתן לקבל כתוצאה מחיבור של תנועה משיקית קצובה (גודל המהירות קבוע) ותנועה שוות תאוצה כלפי מרכז הסיבוב (נפילה). שתי התנועות חייבות להיות מתואמות: המהירות המשיקית v של גוף הנע במסלול מעגלי בעל רדיוס R תואמת לתאוצה של הנפילה כלפי מרכז הסיבוב: $a = \frac{v^2}{R}$

5. התאוצה כלפי מרכז הסיבוב מכונה **תאוצה צנטריפטאלית:** $a_{c.p.} = \frac{v^2}{R}$

6. באפיון של תנועה סיבובית מודדים את הזוויות ברדיאנים שהם מידות היחס בין אורך הקשת לבין רדיוס הסיבוב: $\varphi = \frac{L}{R}$

7. מגדירים את המהירות הסיבובית כקצב שינוי הזווית על ידי הגוף, המקיים את התנועה הסיבובית: $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

8. קיים קשר בין המהירות הזוויתית של הסיבוב ω לבין המהירות המשיקית v:

$$v = \omega \cdot R$$

9. מגדירים את זמן המחזור T כזמן הנדרש לגוף לבצע סיבוב אחד.

10. קיים קשר בין זמן המחזור לבין המהירות הזוויתית: $\frac{2\pi}{T} = \omega$

11. מגדירים את התדירות f כמספר הסיבובים של הגוף ביחידת זמן.

12. הקשר בין התדירות לבין זמן המחזור הוא: $f = \frac{1}{T}$

13. הקשר בין התדירות למהירות הזוויתית הוא: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$



1. כדור נבעט אנכית כלפי מעלה. הנכון הוא שמהירות הכדור היא מינימאלית:



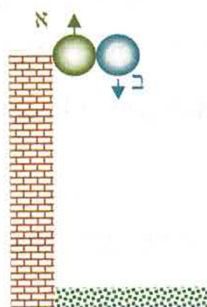
א. ברגע הבעיטה.

ב. בשיא הגובה.

ג. ברגע החזרה לקרקע.

ד. במחצית הגובה.

2. גוף א' נזרק כלפי מעלה, וגוף ב' נזרק כלפי מטה מאותו המהירות. הגובה ובאותה



האם נכון שברגע הפגיעה בקרקע:

א. מהירותו של גוף א' תהיה גבוהה יותר?

ב. מהירותו של גוף ב' תהיה גבוהה יותר?

ג. מהירות הגופים תהיה שווה?

ד. לא ניתן יהיה לדעת לאיזה גוף מהירות גבוהה יותר?

3. האם נכון שזריקה אנכית כלפי מעלה:

א. זמן העלייה שווה לזמן הירידה?

ב. הגוף חוזר למקום הזריקה באותה המהירות בה הוא נזרק?

ג. בכל נקודה של המסלול מהירות עלית הגוף שווה למהירות ירידתו?

ד. כל התשובות נכונות?

4. האם נכון שגוף הנזרק כלפי מטה:

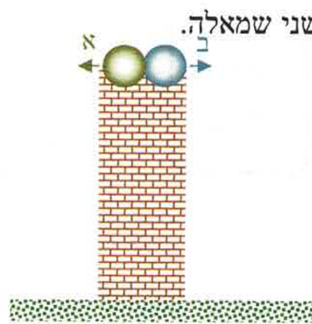
א. מגיע לקרקע במהירות אפס?

ב. מהירותו ברגע הזריקה היא מרבית?

ג. מהירותו ברגע הזריקה שווה לאפס?

ד. מהירותו ברגע הפגיעה בקרקע היא מרבית?

5. מראש מגדל נזרקים בו זמנית שני גופים, האחד ימינה והשני שמאלה.



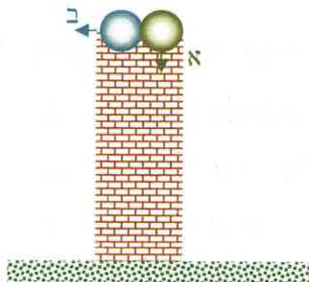
הגופים יגיעו יחד לקרקע אם:

א. הם נזרקו באותה המהירות.

ב. לשני הגופים הייתה מסה זהה.

ג. הם נזרקו במהירויות שונות.

ד. כל התשובות נכונות.



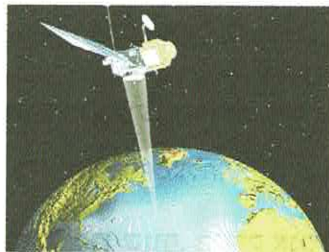
6. מראש מגדל זורקים גוף אחד אופקית וגוף שני משחררים בנפילה חופשית. האם נכון ש:

א. הגוף הנופל חופשית יגיע קודם לקרקע.?

ב. הגוף שנזרק אופקית יגיע קודם לקרקע?

ג. שני הגופים יגיעו יחד לקרקע?

ד. לא ניתן לדעת איזה גוף יגיע ראשון לקרקע?



7. הלוויינים המלאכותיים הסובבים את כדור הארץ:

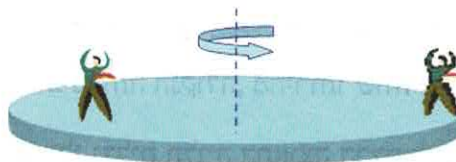
א. נופלים כלפי כדור הארץ.

ב. מתרחקים מכדור הארץ.

ג. נופלים כלפיו ומתרחקים ממנו בו זמנית.

ד. כל התשובות נכונות.

8. שני אנשים נמצאים על קרוסלה הנעה בתנועה מעגלית במהירות קבועה, זה מחייב ש:



א. אין להם תאוצה.

ב. אין להם תאוצה בכיוון המשיק לתנועתה.

ג. אין להם תאוצה רדיאלית.

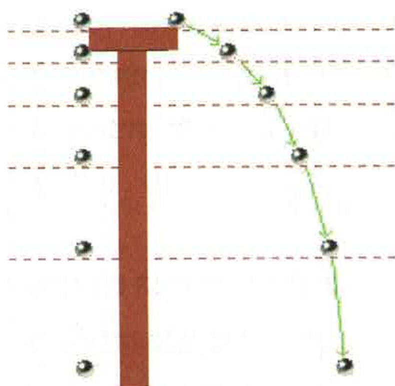
ד. כל התשובות אינן נכונות.



1. האם יתכן מצב בו גוף, הנזרק כלפי מעלה, יגיע לקרקע באותה המהירות של גוף, הנזרק כלפי מטה? הסבירו.

2. כשגוף נזרק כלפי מעלה מה תהיה תאוצתו ומה תהיה מהירותו בשיא הגובה ?

3. שרטטו גרפים של: המהירות, התאוצה והמקום כפונקציה של הזמן עבור:
   א. גוף הנזרק אנכית כלפי מעלה עד לחזרתו למקום הזריקה.
   ב. גוף הנזרק אנכית כלפי מטה.
   ג. גוף הנופל באופן חופשי.



4. הסבירו, מדוע גוף, הנזרק אופקית, וגוף, הנופל חופשית מאותו הגובה, מגיעים יחד לקרקע.

5. הסבירו מדוע, מהירותו של גוף, הנזרק בזווית כלפי מעלה, אינה שווה לאפס בשיא הגובה.

6. האם יתכן שגוף, הנזרק אנכית כלפי מעלה, וגוף, הנזרק מאותו הגובה בזווית כלפי מעלה, יגיעו יחד לשיא הגובה ? נמקו.

7. מהו התנאי לכך, שגוף כבד וגוף קל, המשוחררים מאותו הגובה, יגיעו יחד לקרקע ?

8. גוף, הנזרק כלפי מעלה, חולף על פני נקודה מסוימת. האם כאשר הוא נופל ועובר שוב באותה הנקודה, מהירותו שווה ? נמקו.

9. באילו גדלים תלויה התאוצה הרדיאלית ?

10. הסבירו כיצד קורה, שגוף, הנע בתנועה מעגלית, שומר על מרחק קבוע ממרכז הסיבוב.



1. כדור נבעט כלפי מעלה במהירות 30 m/sec.



א. מהי מהירות הכדור בשיא הגובה?

ב. מהו שיא הגובה של תנועתו?

ג. תוך כמה זמן מרגע הזריקה יגיע הכדור לשיא הגובה?

ד. תוך כמה זמן מרגע הזריקה יחזור הכדור לגובה הזריקה?

ה. שרטטו את גרף המהירות כפונקציה של זמן.

2. צנחן קופץ ממטוס וצונח בצניחה חופשית 40 sec. לאחר מכן הוא פותח מצנח, המביא אותו למהירות קבועה של 4 m/sec בתאוטה של $8\ m/sec^2$-. לאחר עוד 400 m הוא מגיע לקרקע.



א. מהו הגובה ממנו קפץ הצנחן?

ב. כמה זמן ארכה הצניחה?

ג. שרטטו גרף של מהירות הצנחן כפונקציה של הזמן מרגע הצניחה ועד לפגיעה בארץ.

3. שק חול נופל מכדור פורח ופוגע בקרקע כעבור 15 שניות.

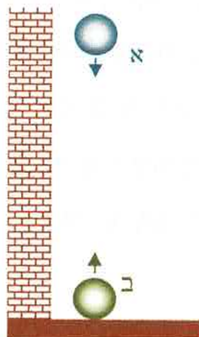
מה היה גובה הכדור הפורח, אם ברגע הטלת השק הוא היה במצב של מנוחה?

4. אבן נזרקת מגשר אנכית כלפי מטה במהירות 10 m/sec. היא פוגעת במים 3 שניות לאחר זריקתה.

א. מהי מהירותה ברגע הפגיעה במים?

ב. מהו גובה הגשר?

5. כדור א' נזרק מראש בנין שגובהו 120 m במהירות 40 m/sec כלפי מטה. באותו רגע נזרק כלפי מעלה מתחתית הבניין כדור ב' במהירות 20 m/sec.



א. היכן, ביחס לרצפת הבניין, יחלפו הכדורים זה על פני זה?

ב. מה תהיה מהירות פגיעתם בקרקע?

ג. שרטטו גרף של $v(t)$ לשני הכדורים באותה מערכת צירים.

6. התאוצה הרדיאלית המקסימאלית המותרת לטייס במטוס F-16 היא 9g (תשע פעמים תאוצת הכובד).

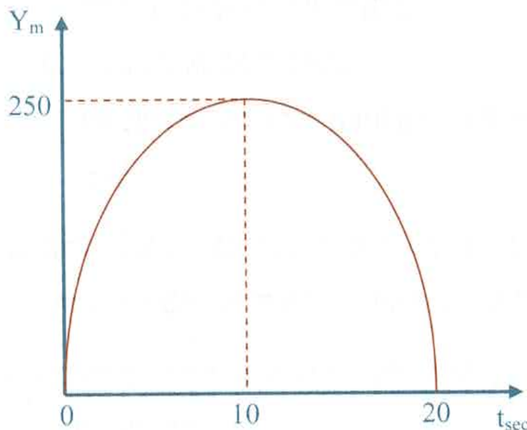


מהו רדיוס הסיבוב האופקי המינימאלי המותר למטוס F-16, הטס במהירות קבועה של 200m/sec ?

7. בניסוי, שנערך על פני כוכב לכת דמיוני, נזרק גוף אנכית כלפי מעלה במהירות התחלתית שגודלה V_0.

התרשים שלפניך מתאר את מקומו של הגוף כפונקציה של הזמן.

ציר מקום y מוגדר כך, שכיוונו החיובי הוא כלפי מעלה וראשיתו בנקודה (על הקרקע), שממנה נזרק הגוף. t=0 מוגדר כרגע זריקת הגוף.



א. כעבור כמה זמן מרגע הזריקה מתאפסת מהירות הגוף ?

ב. מצאו את תאוצת הנפילה החופשית על פני כוכב הלכת.

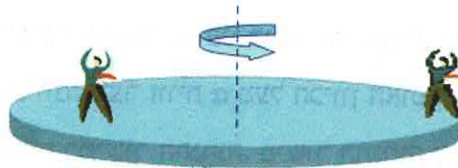
ג. מה הייתה מהירותו ההתחלתית של הגוף?

ד. האם מהירות הגוף ברגע t=5(s) שווה למהירותו ברגע t=15(s) ?

ה. זורקים את הגוף הזה על פני כדור הארץ באותה המהירות.

1. האם הגובה המרבי אליו מגיע הגוף שעל פני כדור הארץ, גדול מזה שעל פני כוכב הלכת, קטן ממנו או שווה לו? נמקו.

2. סרטטו גרף מקורב של מקום הגוף על פני כדור הארץ כפונקציה של הזמן מרגע הזריקה ועד לפגיעת הגוף בקרקע (ציינו ערך הגובה המרבי וזמן התנועה הכולל).



8. שני אנשים עומדים על סחרחרה, שרדיוסה $R=5m$, המשלימה סיבוב אחד ב- 8 שניות.

הראשון נימצא על שפת הסחרחרה, והשני- במרחק של 2.5m מציר הסיבוב.

א. ענו ללא חישוב:

1) תאוצתו של מי גדולה יותר? פי כמה?

2) למי מבין שניהם מהירות קווית גדולה יותר? פי כמה?

3) למי מבין שניהם מהירות זוויתית גדולה יותר? פי כמה?

ב. חשבו את התאוצה הרדיאלית, את המהירות הקווית ואת המהירות הזוויתית של כל אחד מהאנשים.

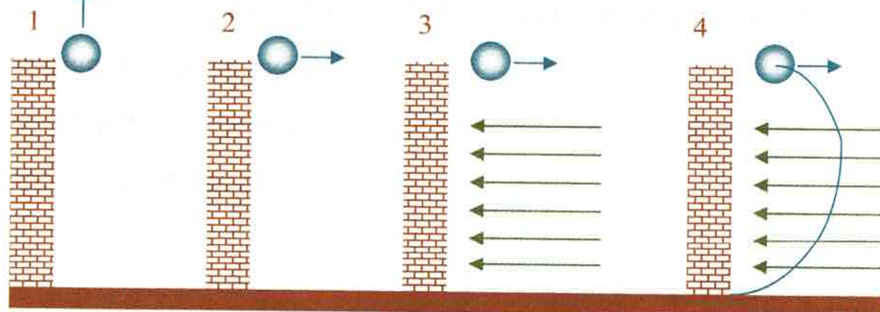
9. מקצה מגדל, שגובהו $h=80\ m$, נזרק כדור זקופות כלפי מעלה במהירות התחלתית של $V_0=40\ m/sec$ (התעלמו מהתנגדות האוויר). (תרשים 1)

א. לאיזה גובה מקסימאלי מעל לקרקע יגיע הכדור,וכעבור כמה זמן יגיע לגובה זה?

ב. אם הזריקה הייתה באותה המהירות V_0 אך בכיוון האופקי, כעבור כמה זמן יגיע הכדור לקרקע, ומה יהיה מרחק פגיעתו מרגלי המגדל:

1. כאשר מתעלמים מהתנגדות האוויר? (תרשים 2)

2. כאשר רוח נגדית מאיצה את הכדור בתאוצה של $5(m/s^2)$ בכיוון שמאלה,אך אינה משפיעה על התנועה בכיוון האנכי? (תרשים 3)



ג. 1. באיזו מהירות בכיוון האופקי היה צריך לזרוק את הכדור, בכדי שיפגע ברגלי המגדל, כאשר פועלת אותה רוח נגדית? (תרשים 4)

2. מה תהיה אז מהירות הפגיעה בקרקע בכיוון האנכי ובכיוון האופקי? (גודל וכיוון)

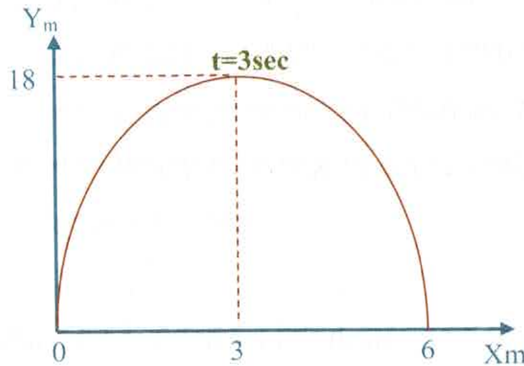
10. בניסוי שנערך על פני כוכב לכת דמיוני נזרק גוף במהירות התחלתית שגודלה V_0 וכיוונה יוצר זווית α מעל הכיוון האופקי. התרשים שלפניך מתאר את מקומו של הגוף במישור התנועה. מישור התנועה מתואר על ידי ציר ה-x וציר ה-y.

א. 1. איזה מרחק אופקי עובר הגוף במשך זמן זה?

2. מהו הגובה המרבי אליו מגיע הגוף?

ב. מצאו את תאוצת הנפילה החופשית על פני כוכב הלכת.

ג. מה הייתה מהירותו ההתחלתית של הגוף בכיוון האנכי ובכיוון האופקי?



11. גוף מקבל מהירות התחלתית של 5 m /sec בקצה שולחן שאורכו 2 m וגובהו מעל הרצפה 5 m. בקצה השני של השולחן נופל הגוף לרצפה ופוגע בה במרחק X משפת השולחן.

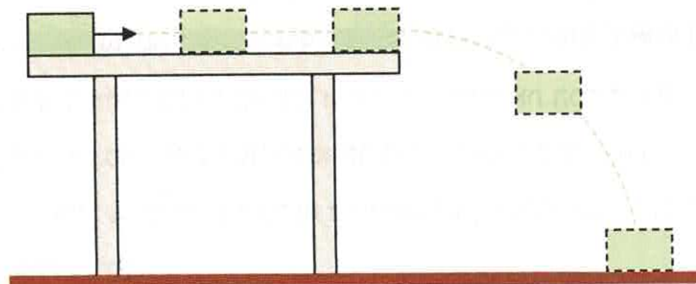
בהנחה שהשולחן חלק:

1) מהו המרחק X?

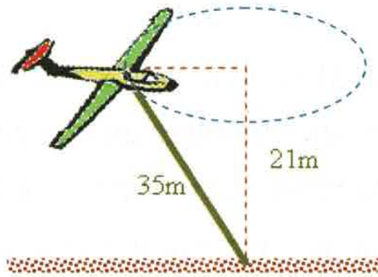
2) כמה זמן ארכה התנועה מתחילת התנועה על השולחן ועד לפגיעה בארץ?

3) שרטטו גרף של המהירות האופקית של הגוף כפונקציה של הזמן מתחילת התנועה ועד הפגיעה בארץ.

4) שרטטו גרף של המהירות האנכית של הגוף כפונקציה של הזמן מתחילת התנועה ועד לפגיעה בארץ.



12. טיסן ממונע, שמסתו 0.9 ק"ג, טס במהירות קבועה במעגל אופקי בקצה כבל באורך 35m ובגובה 21m מעל לקרקע . קצהו השני של הכבל מעוגן לקרקע. הטיסן משלים 5 הקפות בדקה, וטס כשכנפיו מאוזנות,כך שכוח העילוי שהאוויר מפעיל עליו פועל אנכית כלפי מעלה.
מהי התאוצה הרדיאלית של הטיסן ?



13. טיל מתחיל לעלות ממנוחה על פני כדור הארץ ישירות כלפי מעלה בתאוצה קבועה של $5\ m/sec^2$. כאשר הוא בגובה 600 m ניתק ממנו חלק.



א. תוך כמה זמן מרגע תחילת העלייה של הטיל יפגע החלק בקרקע?
ב. מהי מהירות פגיעת החלק בקרקע?
ג. שרטטו גרף של מהירות החלק כפונקציה של הזמן מרגע תחילת התנועה של הטיל.

תשובות

1. א. 0 ב. 45m ג. 3s ד. 6 s
2. א. 18399m ב. 189.5s **3.** 1125m **4.** א. 40 m/s ב. 75 m
5. א. 20m ב. -63.24 m/s , - 20m/s **6.** 444.44 m
7. א. 10s ב. $5m/s^2$ ג. 50m/s ד. לא, שווה בגודל ושונה בכיוון.
ה. 1) קטן ממנו, 125m.
8. א. 1. הרחוק יותר פי 2 2. הרחוק יותר פי 2 3. זהה
ב. $3.084\ m/s^2$, $1.542\ m/s^2$, 3.926 m/s, 1.963 m/s
9. א. X=160m , t=4s ב. 1) x=160m , t=4s 2) x=120m , t=4s
ג. 1) 10m/s 2) Vx=-10m/s , Vy=-40m/s
10. א. 1) 6 m 2) 18 m ב. $4\ m/s^2$ ג. $V_{0x}=1m/s$, $V_{0y}=12m/s$
11. 1) 5m 2) 1.4s **12.** $7.67\ m/s^2$
13. א. 36.65s ב. -134.16 m/s

פרק ג' - כוחות

פיזיקה היא תחום במדעי הטבע, המנסה להסביר כיצד מאורגן העולם הדומם של הגופים והתופעות הסובבים אותנו, איזו חוקיות קיימת בו, ולפי איזה כללים מתרחשים דברים. במאמץ זה יצרו מדענים מערכת מושגים הרבה יותר מדויקת מהמושגים ומהתפיסות בהם אנו משתמשים בחיי היום- יום. בספר זה נכיר מושגים אלה, ובעזרתם נציג את החוקים העומדים מאחרי הרבה מתופעות הטבע והטכנולוגיה שפיתח האדם על מנת להקל על חייו ולשפר אותם.

נתחיל מהמושג המרכזי בפיזיקה: כוח.

מהו כוח?

לכל אחד ישנה תחושה אינטואיטיבית מהו כוח. מושג זה נמצא בשימוש רחב בשפת היום - יום ברוב תחומי הפעילות: "אין לי כוח", "השיג בכוח", "יישר כוח", "כוח רצון", "כוח סבל", "כוח נפשי", "ייפוי כוח", "כוח מניע", "תחנת כוח" וכו'.

לעומת שימוש זה, שהוא רחב, חושי ומעורפל במשמעותו, בשפה המדעית, למושג כוח יש משמעות מוגדרת ומדויקת. כדי להכיר אותה נביא מספר הדגמות בהן נדון ונגבש את המושג הפיזיקאלי של כוח, ונכיר את תחום תקפותו והגדרתו במדע. ההדגמות תצגנה סוגים שונים של כוחות, שעליהם נדון בהמשך.

כוחות במגע



הדגמה מס' 1

נדמיין כדורגלן בועט בכדור, בין אם הוא בתנועה או במנוחה. עקב הבעיטה הכדור משנה את מצב תנועתו. הסיבה ל**שינוי** במצבו של הכדור ברורה - הבעיטה של השחקן.

לגורם השפעה זה, שהביא לשינוי בתנועתו של הכדור, נקרא כוח.

בשפת היום- יום, נהוג לקרוא לכוח זה **"כוח פיסי"**. כינוי זה מדגיש, שמקורו של כוח זה בשריריו של השחקן, וסיבתו - רצונו.

לפעולתו של כוח זה אנו משייכים דחיפה, גרירה וזריקת חפצים, הנובעים מפעילות האדם באופן ישיר. אולם מתברר שכוח פיסי אינו מיוחד במינו, ואין צורך מדעי להפריד בינו לבין כוחות אחרים, הגורמים לאותן תוצאות. לכן **לא** נצטרך להשתמש במושג זה בהמשך דיוננו בכוחות ובהשפעתם.

מהדגמה זו נשמור מסקנה חשובה מאוד, שניתן לחזק אותה בניסויים רבים: ההשפעה בין הגופים השונים מתבטאת בשינוי תנועתם. השפעה זו אנו מקשרים לקיום הכוחות בין הגופים.



בכל מקרה של שינוי בתנועתם של גופים
נסיק על פעולת כוחות.

בפרק א' הגדרנו במדויק כיצד לתאר תנועה לאחר שהתחלנו לאפיין אותה. ועתה, ניתן לטעון שכוח גורם לשינוי במהירות.

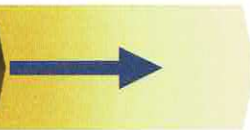
בכל פעם שנציין בספר שינוי בתנועה הכוונה היא לשינוי במהירות.

הדגמה מס' 2

נתבונן בכדור הנע לאחר שנבעט. הכדור נמצא בתנועה, אך לאחר שהוא עובר מרחק מה, הוא עוצר. בהתאם למצבי סביבה שונים, המרחק שעובר הכדור יהיה שונה. בכל מקרה נוכל לומר, שחל שינוי במצב התנועה של הכדור: הכדור עוצר.

מצב התחלתי





מצב סופי



בשפה פיזיקאלית נטען, **שכוח** מסוים גרם **לשינוי בתנועה.** כוח זה מקורו בהשפעה חיצונית: הרצפה (ניתן לוודא זאת אם נשנה את סוג הרצפה) ונוכחות האוויר (אנו מניחים שהמשטח אינו מוגבל כלל, והכדור היה יכול לנוע).

לכוח, שפעל בין הכדור למשטח ואוויר, נקרא **כוח החיכוך**. בהמשך נכיר סוגים שונים של כוח זה.



כוח החיכוך פועל בין גופים הנמצאים במגע, וגורם לשינוי התנועה היחסית ביניהם.

הדגמה מס' 3



הפעם, במקום לבעוט יניח השחקן את רגלו בחוזקה על הכדור. ניתן לראות, שחל שינוי בצורתו של הכדור. הוא נעשה פחוס וצורתו אינה כדורית יותר.

מה גרם לכך? הכדור היה נתון להשפעה חיצונית מצד השחקן. גם מצב זה נקשר עם קיום הכוח, שהופעל על הכדור. בעקבות ההשפעה של הכוח התרחש **שינוי בצורת הכדור**.

נוכל להרחיב ולסכם:

בכל מקרה של פעולת כוח, התוצאה היא שינוי בתנועה או שינוי בצורתו של הגוף.

הערה: לא תמיד נוכל לראות את שינוי הצורה שנגרם לגוף. לעיתים נדרש מאמץ מיוחד כדי לוודא קיום שינוי צורה (עיוות) זה. כך למשל, לא נבחין בקלות בשינוי צורה, אם נחליף את כדור הגומי בכדור מתכת. אך, גדול או קטן, עיוות זה קיים **תמיד**.

הדגמה מס' 4



ברגע שהשחקן ירים את רגלו מהכדור, יחזור הכדור לצורה המקורית שהייתה לו לפני כן. שינוי הצורה נמשך כל עוד פועל כוח חיצוני. הכוח המחזיר את הגוף לצורתו המקורית, נקרא **כוח אלסטי**.

בהמשך נכיר שלושה מצבים עיקריים, בהם מעורב כוח אלסטי:

א. פעולת הקפיץ.

ב. הכוח בחבל מתוח.

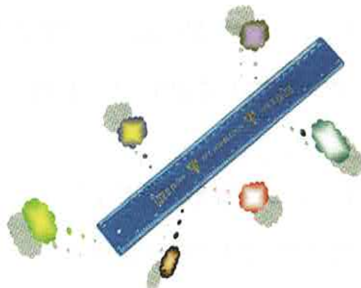
ג. כוח תגובה של משטח תמיכה.

עד כה, בכל הדוגמאות שהבאנו, היה מגע ישיר בין הגופים, שפעל ביניהם הכוח, לכן גם לכוחות אלה (חיכוך ואלסטי) נקרא כוחות מגע.

כוחות הפועלים ללא מגע (מרחוק)

נבדוק עתה, אם תיתכן פעולה של כוח בין גופים ללא מגע ביניהם.

הדגמה מס' 1

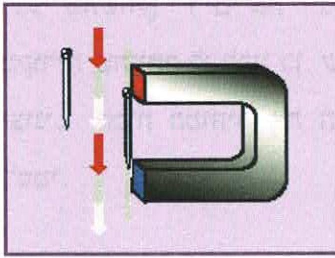


ניקח סרגל העשוי פלסטיק, ונשפשף אותו בשיער או בצמר. נפזר פיסות נייר קטנות על השולחן, ונקרב את הסרגל אליהן. פיסות הנייר תמשכנה לעבר הסרגל, למרות שלא נוצר מגע ביניהם.

אנו עדים למקרה ברור של **שינוי בתנועה** (פיסות הנייר נעות אל הסרגל). פיסות נייר אלו מושפעות מהשפעה חיצונית ללא מגע עם שום גוף.

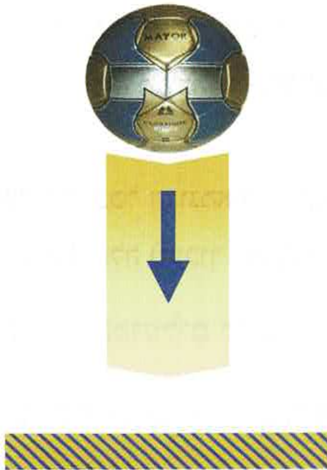
בעת שפשוף הסרגל בשיער או בצמר משתנה מצבו של החומר בסרגל, והוא, במצבו החדש, משפיע על פיסות נייר. אנו מתארים השפעה זו כהפעלת כוח, המכונה כוח חשמלי.

הדגמה מס' 2



נקרב מגנט אל ערימה של מסמרים קטנים. המסמרים יימשכו למגנט, הרבה לפני שנוצר מגע בינם לבין המגנט. אנו צופים כאן בשינוי תנועה של המסמרים. ללא מגע משפיע המגנט על החפצים סביבו. השפעה זאת אנו מתארים בעזרת כוח המכונה **הכוח המגנטי**.

הדגמה מס' 3



נרים כדור לגובה מסוים מעל לקרקע, וברגע שנשחרר אותו, הכדור ייפול מטה. שוב אנו צופים בשינוי מצב התנועה של חפץ (הכדור) **ללא מגע** עם שום גוף אחר. את הכוח, אותו אנו משייכים להשפעה על הכדור, שגרמה לנפילתו, אנו מכנים **כוח הכובד**. אנו מקשרים כוח זה לקיום של שני הגופים: הכדור וכדור הארץ . כוח הכובד פועל ביניהם ללא מגע.

כידוע, נפילה היא תכונה של גופים רבים סביבנו. אנו מסיקים מכך, שעל כולם הופעל כוח הכובד מצד כדור הארץ. כוח זה אינו תלוי במצב התנועה של הגופים, במנוחה, בתנועה מהירה או איטית. הכוח מושך אותם מטה, כלפי הקרקע.

נסכם את ההתנסות בשלושת ההדגמות האחרונות:



לכוח החשמלי, לכוח המגנטי ולכוח הכובד נקרא כוחות הפועלים ללא מגע, או כוחות הפועלים מרחוק.

הערה: אף שהבחנו בין כוחות הפועלים במגע לבין כוחות הפועלים ללא מגע, בהמשך לימוד הפיזיקה תגלו, שגם הכוחות הפועלים במגע נובעים למעשה מן הכוחות הפועלים ללא מגע: הכוח החשמלי והכוח המגנטי (קיימים גם כוחות אחרים). עם זאת מוצדק וכדאי להשתמש במכניקה בהבחנה בין כוחות במגע לבין כוחות ללא מגע.

בהדגמות שהבאנו צברנו התנסות מסוימת לגבי תכונות אופייניות לתופעות, בהם מתרחש שינוי במצב התנועה של גופים או בצורתם החיצונית. הגדרנו את הגורם לשינויים אלו ככוח הפועל בין גופים בפעילות הגומלין ביניהם. במציאות פועל על הגופים בו זמנית יותר מכוח אחד.



נסתכל בכדור ששחקן מחזיק בידו. על הכדור פועל **כוח הכובד**, המושך את הכדור כלפי מטה. הכדור אינו נופל. מדוע? אנו מסבירים זאת על ידי פעילות כוח נוסף, הכוח מצד כף ידו של השחקן, והוא פועל כלפי מעלה ומונע את נפילת הכדור. כתוצאה מפעילות שני הכוחות נשאר הכדור במצב מנוחה ואינו משנה את תנועתו. נסיק מכאן, ששני הכוחות הם **שווים בגודלם והפוכים בכיוונם**.

נוכל לקבוע באופן כללי:



> כאשר על גוף פועלים מספר כוחות, והגוף אינו משנה את מצב תנועתו, הכוחות מאזנים זה את זה.

כוחות הפועלים על גוף מסוים מאזנים זה את זה, כאשר הם שווים בגודלם, ופועלים בכיוונים מנוגדים. נשים לב לכך, שבדוגמה שלנו דנו בכוחות הפועלים על הכדור בלבד. אם היינו מתעניינים בכוחות הפועלים על כף היד, היינו מסיקים על הכוח שבו מעיק הכדור על כף היד.

כדי להיות מצוידים בכלים לניתוח כוחות, הפעולים על גופים, עלינו לקבוע כללים המאפשרים זאת. ההדגמות שערכנו עד כה הציגו לפנינו ניסיון רב. מטרת הפיזיקה היא לנסח מסקנות מן ההתנסות הרחבה בצורה של מספר קטן של כללים, התקפים למגוון רחב של מצבים. נעשה כך, לגבי ההתנסות בכוחות.

6) המשותף לכוח חשמלי ולכוח מגנטי הוא:

א. שניהם יכולים גם למשוך וגם לדחות גופים.

ב. לשניהם יש השפעה, רק כאשר הגופים קרובים.

ג. לשניהם יש השפעה, רק כאשר הגופים רחוקים מאוד זה מזה.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

7) הנכון לגבי כוח אלסטי הוא שהכוח:

א. פועל להשאיר את הגוף באותה הצורה, אליה הגיע לאחר שפעל עליו כוח.

ב. פועל להחזיר את הגוף לצורה המקורית שלו, לפני שפעל עליו כוח.

ג. תלוי תמיד בגודלו של כוח הכובד הפועל על הגוף.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

8) אחד ההבדלים בין כוח פיסי לכוח חיכוך הוא:

א. כוח פיסי גורם לשינוי בצורת גופים, וכוח חיכוך לא.

ב. כוח פיסי גורם תמיד לשינוי בתנועה של גופים, וכוח חיכוך לא.

ג. כוח פיסי אינו מושפע מהמשטח שעליו מונח הגוף, ואילו כוח החיכוך כן.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

9) כאשר גוף מונח על שולחן ללא תנועה:

א) לא פועלים עליו כוחות.

כ) השולחן חלק.

ג) השולחן אינו חלק.

ד) הכוחות הפועלים עליו מאזנים זה את זה.

10) המשותף לכוח הכובד ולכוח החשמלי:

א) שניהם דוחים את כל הגופים שבקרבתם.

ב) שניהם מושכים את כל הגופים שבקרבתם.

ג) שניהם פועלים גם מרחוק.

ד) שניהם פועלים רק מרחוק.

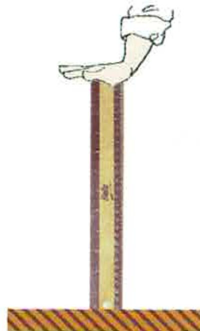


כוחות הפועלים במגע ומרחוק

1. ציינו את הכוח או הכוחות הפועלים על הגוף (המסומן בצבע) ואת כיוונם (מעלה או מטה)



א. כדור נע כלפי מעלה.



ב. יד מכופפת סרגל.

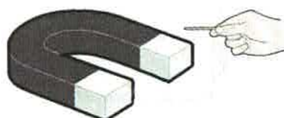


ג. כדור נבעט כלפי מעלה (כוחות בזמן הבעיטה).

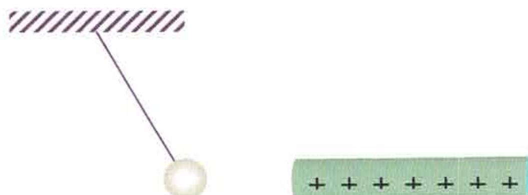


ד. תלמיד מחזיק ספר בשתי ידיו

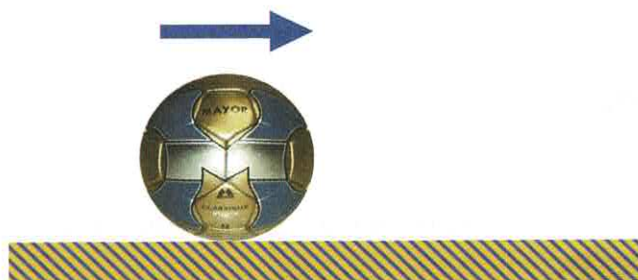
ה. תלמידה מחזיקה מסמר פלדה מעל מגנט



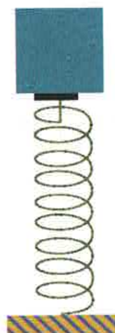
ו. סרגל, ששופשף בצמר, מושך כדור קלקר התלוי לתקרה.



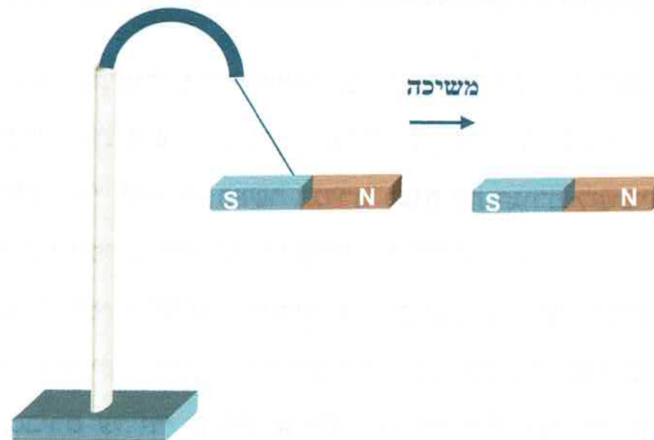
ז. כדור נע על פני משטח לא חלק.



ח. גוף מונח על קפיץ המחובר לרצפה.



ט. מוט מגנטי התלוי, על כן, נמשך למגנט שני.



י. ירח מקיף את כדור הארץ.



2) כוח אחד מופיע בכל חמשת הסעיפים בשאלה 1.

א. ציינו מהו כוח זה.

ב. האם ייתכן מצב על פני כדור הארץ שכוח זה לא יופיע? נמקו!

3) השלימו את המילים החסרות במשפט הבא (העזר בתרמילון):

כאשר על גוף מסוים פועלים מספר כוחות מגע ________ זה את זה, הגוף לא ישנה את ________, אך בכל מקרה ישנה את ________, גם אם אין ________ זה ______ תמיד לעין.

תרמילון: שינוי, המאזנים, צורתו, תנועתו, נראה



פתחנו את הספר בתיאור סוגים שונים של תנועה, מבלי להתייחס לסיבות, הקובעות את אופי התנועה. לאחר מכן, על סמך ניסויים, יכולנו לנסח את כללי התנועה, כאשר הגדרנו **כוח** את הגורם לשינוי במצב התנועה של גופים. לחוקים אלו קראנו "חוקי הכוח".

"חוקי הכוח", כפי שנוסחו, מתארים את התנהגות הגופים סביבנו. בפיזיקה אין זו מטרה מספקת. הפיזיקה שואפת לגילויים של חוקים בסיסיים ככל שניתן (כלומר, כאלה שלא ניתן להסבירם על ידי חוקים אחרים) וגם לחוקים, הניתנים לניסוח באופן כמותי (מתמטי) מדויק. תוכנית זו בוצעה על ידי פיזיקאי אנגלי דגול במאה ה-17 – אייזק ניוטון.

ניוטון חשב שכדי לדעת חוקים בסיסיים, יש לחקור את תנועתם של כוכבי הלכת. עבורם לא קיימים כוחות חיכוך וגמישות, ותנועתם מעידה על החוקיות הבסיסית הקיימת בתנועת הגופים בטבע. כלומר, החוק הרביעי שניסחנו עבור שינוי צורה של הגוף כתוצאה מהשפעת כוח עליו, אינו בסיסי. לו יכולנו להסתכל על החלקיקים המרכיבים כל גוף, לא היינו רואים שהם נוגעים זה בזה, ולא היינו רואים, שהם משנים צורה.

החוק הראשון של ניוטון- חוק ההתמדה

הניסיון היום יומי שלנו מראה, שקשה לגרום לגוף, הנמצא במנוחה, לנוע, ובאותה המידה קשה לעצור גוף, הנמצא בתנועה. כלומר, ניתן להסיק שכל הגופים שואפים להישאר במצב תנועתם, ואין זה משנה אם מדובר בעליית המהירות (תאוצה) או בירידת המהירות (בלימה). בדיוק באותה התנגדות אנו חשים, כשאנו רוצים להניע גוף ממצב מנוחה.

שאיפת הגופים לא לשנות את מצב תנועתם, או התנגדות הגופים לשינוי מצב התנועה (כולל מנוחה) מכונה תכונת **ההתמדה**.



נדגים את ההתמדה בניסוי הבא:

נעמיד משקולת גבוהה על עגלה וניתן <u>דחיפה חזקה</u> לעגלה בכיוון **שמאלה**. המשקולת תיפול ימינה.

נחזור על הניסוי אלא, שהפעם נדחוף את העגלה דחיפה קלה בכיוון שמאלה. העגלה תנוע כשהמשקולת עומדת עליה.



לאחר התנועה במישור העגלה תתנגש במחסום והמשקולת תיפול בכיוון התנועה. התנהגות המשקולת מדגימה את התכונה הכללית של הגופים: השאיפה להישאר במצב תנועה ללא שינוי.

זהו החוק הראשון של ניוטון, הקובע:

> כל גוף מתמיד במצב תנועתו במהירות קבועה בקו ישר או במנוחה,
> עד אשר כוח חיצוני מאלץ אותו לשנות את מצב תנועתו.

את התמדת הגופים אנו מזהים בתופעות רבות, המוכרות לנו: כאשר אנו נמצאים במכונית, המשנה את גודל מהירותה, כאשר המכונית מתחילה לנוע, או בולמת ועוצרת, או כאשר היא משנה את כיוונה,למשל בביצוע פנייה חדה, הגוף שלנו ממשיך להישאר במצב התנועה הקודם, ואנו מפרשים זאת כשאיפת הגוף להתמיד במצב הקודם של התנועה.



בכל המקרים נדמה לנו, שפועל עלינו כוח ("קדימה", "אחורה", "החוצה" וכדומה), אך ניתן להסביר התנהגות זו גם אחרת: לפי החוק הראשון של ניוטון כל גוף שואף להישאר במצב תנועה מסוים ללא שינוי.

לעומת זאת, כאשר מתאזנים כל הכוחות, הפועלים על גוף מסוים (הכוחות פועלים באותה מידה בכיוונים הפוכים), הגוף ישמור על מצב תנועתו במהירות קבועה בכיוון ובגודל.

מצב של איזון כוחות מוצג בטענה ש- "הכוח השקול" שסימנו F_R מתאפס:

$$F_R \equiv \sum_i F_R = 0 \qquad \Rightarrow \quad V=const$$

בכל תנועה מואצת, בין אם בכיוון או בגודל, משתנה מצב התנועה, והדבר מעיד על כך, שהכוחות הפועלים על הגוף אינם מאוזנים: $F_R \neq 0$

דוגמה

הכוחות הפועלים	3 ← , → 3	3 ← , → 5	→ 3 , → 5
הכוח השקול	0	→ 2	→ 8

<u>שאלות</u>

1. מה קורה לנהג במכונית, כאשר רכבו נבלם לפתע? הסבירו מדוע!
2. בעת בלימה פתאומית של הרכב, או בעת תחילת תנועתו של הרכב, נזרק קדימה או אחורה פלג הגוף העליון של הנהג. מדוע פלג הגוף העליון ולא פלג הגוף התחתון ?
3. מדוע בקצה התחתון של כל מגלשה (בגן ציבורי או בפארק מים) ישנם ארגז חול או בריכת מים?

החוק השני של ניוטון

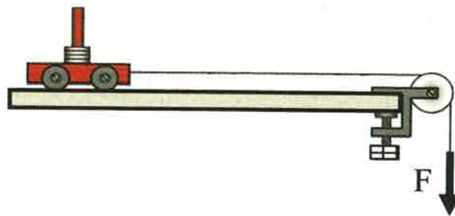
כפי שלמדנו, חוק הכוח השני מעיד על כך, שכוח חיצוני משנה את מצב תנועתו של הגוף, עליו הוא פועל. ניוטון ניסח טענה זו באופן מדויק, המאפשר חישוב. אם **מצב התנועה** הוא תנועה במהירות קבועה, אזי את שינוי המצב ניתן לתאר על ידי **תאוצה**.

הגדרנו את התאוצה כקצב שינוי התנועה: $a = \dfrac{v(t_2) - v(t_1)}{t_2 - t_1}$

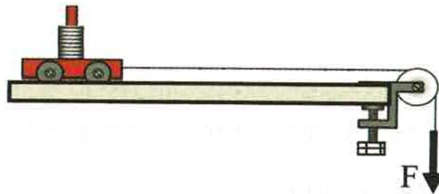


גם את הכוח F הגדרנו כמידת ההשפעה ההדדית בין הגופים אשר ניתן למדוד אותה, למשל, על ידי עיוות של קפיץ, כלומר, על-ידי מכשיר המכונה מד כוח. החוק השני של ניוטון קובע קשר מדויק בין שני גדלים: בין הכוח F, הפועל על הגוף (יותר מדויק: סכום של הכוחות הפועלים על הגוף – F_R) ובין התאוצה של הגוף a. קשר זה מתקבל כתוצאה מניסויים רבים ומדויקים.

לדוגמה, נבדוק תנועה במערכת המתוארת בתרשים.



עגלה נושאת משקולות מתחילה לנוע ממנוחה עקב המשיכה מצד כוח קבוע F מבעד לגלגלת. נוכל לקבוע על ידי רשם זמן את אופי התנועה של העגלה. הנתונים מעידים על כך, שזו תנועה שוות תאוצה.



נוסיף לעגלה מספר שווה של משקולות, ושוב נמשוך אותה ממנוחה בכוח קבוע F. נמדוד את התאוצה של התנועה. נבחין שבמצב זה קצב שינוי המהירות, התאוצה, היה קטן יותר מאשר במצב הראשון.

אם נחזור על הניסוי, ונשנה בו גם את הכוח המאיץ F, וגם את כמות החומר המואץ (העגלה עם המשקולות שעליה), נוכל לקבל קשר מדויק בין הכוח המאיץ ובין התאוצה של הגוף המואץ.

הניסוי מעיד על כך, שעבור גוף נתון היחס בין הכוח המאיץ והתאוצה הוא יחס ישר, כלומר ניתן לרשום:

$$a \propto F$$

בנוסף, הניסוי מעיד על כך, שכאשר הכוח המאיץ נשאר קבוע, היחס בין התאוצה לבין כמות החומר בגוף (נסמן אותו ב-m) הוא יחס הפוך, כלומר ניתן לרשום:

$$a \propto \frac{1}{m}$$

קשר זה הוא הביטוי לכך שכמות החומר m מהווה מדד להתנגדות הגוף לשינוי במצבו.

מכאן המונח עבור m : מסת ההתמדה של הגוף.

לגבי המסה, הוסכם כי מסה של 1000 סמ"ק מים מזוקקים בטמפרטורה של 4 מעלות צלזיוס תהווה יחידת **מסה** תקנית. יחידה זאת נקראת **1 ק"ג**.

***על מושג המסה נדון בהרחבה בפרק ז'.**

את שתי הטענות מחבר יחד החוק השני של ניוטון, אשר קובע:

$$a \propto \frac{F}{m}$$

או במילים:

התאוצה של כל גוף נמצאת ביחס ישר לכוח הפועל עליו וביחס הפוך למסתו.

על ידי בחירת היחידות למדידה של הגדלים של F, a ו-m ניתן להחליף את הטענה של יחס בטענה של שוויון:

$$a=\frac{F}{m}$$

אותו חוק נהוג לבטא גם בצורה שקולה:

$$F=m\cdot a$$

מתוך השוויון נקבע את היחידות בהן נמדד הכוח:

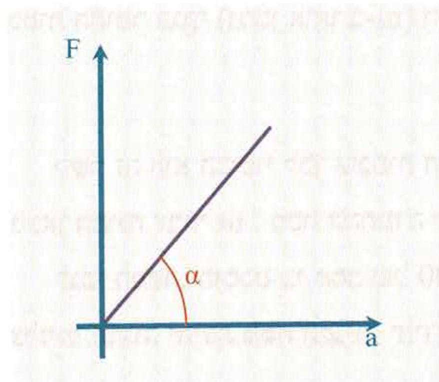
$$[F]=[m]\cdot[a]=kg\cdot\frac{m}{sec^2}$$

ליחידת כוח זו קוראים ניוטון על שמו של אייזק ניוטון, מייסד המכניקה הקלאסית, והיא מסומנת באות N. ניוטון היא **יחידת כוח תקנית** במערכת היחידות הבינלאומית.

1 ניוטון הוא הכוח המקנה לגוף שמסתו 1 ק"ג

תאוצה של 1 מטר חלקי שנייה בריבוע.

$$1N=1kg\cdot1\frac{m}{sec^2}$$



נבטא קשר זה גם באופן גרפי: קו ישר מייצג, כידוע, את הקשר הישר בין הגדלים, כפי שנדרש בחוק השני של ניוטון. השיפוע של הקו הישר, זווית α, נקבע על ידי מסה m.

נשים גם לב לכך, שהחוק טוען לא רק לגבי היחס בין הגדלים של F, a ו-m , אלא גם לגבי זהות הכיוונים של F ו-a, בין כיוון הכוח לבין כיוון התאוצה, כפי שמציינים:

$$a\uparrow\uparrow F$$

כהערה אחרונה לגבי החוק נציין, שהניסוי מעיד על כך, שהשפעת כוחות שונים על התנועה היא בלתי תלויה. טענה זו מהווה עקרון (כלל ללא הסבר) סופרפוזיציה של כוחות:

השפעתם של כוחות שונים על תאוצת התנועה של הגוף היא בלתי תלויה זו בזו.

הביטוי לעקרון זה הוא חשוב. נניח שעל הגוף פועלים מספר כוחות: F_1, F_2 ו-F_3. ניתן לרשום עבור כל אחד מהם את החוק השני של ניוטון:

$$F_1 = ma_1 \quad F_2 = ma_2 \quad F_3 = ma_3$$

ולסכם אותם כפי שמסכמים גדלים פיזיקאליים בעלי כיוון (וקטורים). נקבל עבור הגוף:

$$F_1 + F_2 + F_3 = m(a_1 + a_2 + a_3)$$

או כאשר נסמן את **הכוח השקול** של הכוחות: $F_R = F_1 + F_2 + F_3$

ואת התאוצה של הגוף: $a = a_1 + a_2 + a_3$, נקבל עבור החוק השני של ניוטון:

$$F_R = m \cdot a$$

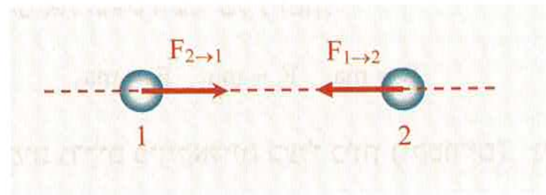
כאמור מותנה החוק בעקרון הסופרפוזיציה של הכוחות הפועלים על הגוף. במילים אחרות, עקרון זה אומר, שהשפעה מסוג אחד על הגופים אינה משפיעה כלל על השפעה מסוג אחר.

נציין גם שלעתים קרובות ניתן לראות בחוק הראשון של ניוטון מקרה פרטי של החוק השני: כאשר הכוח מתאפס, התאוצה מתאפסת גם כן, ומהירות הגוף היא קבועה (תנועת התמד). טענה זו כמובן נכונה, אך, כנראה, לא התאימה לכוונתו של ניוטון עצמו, כשכתב את החוק במאה ה-17. ניוטון ניסח את החוק הראשון כטענה הכללית ביותר על התנהגות הגופים בטבע (לכן היה זה גם **החוק הראשון!**), ואת החוק השני ניסח כעידון של החוק הראשון, כטענה המגדירה באופן מסוים ומדויק את הקשר, הקיים בין הכוח החיצוני לבין התאוצה של הגוף.

החוק השלישי של ניוטון

לעומת התיאוריות הקודמות בפיזיקה מאז ימי אריסטו, במאה הרביעית לפני הספירה, טוען ניוטון שהגופים בטבע השפעתם היא הדדית,כלומר,יש כאן פעולת גומלין. מכאן, לעומת המצב שכשביכול גוף אחד משפיע על גוף שני (צורת חשיבה המעודדת אולי על ידי מחשבה ראשונית) בטבע קיימת אך ורק השפעה הדדית. כך ניסח ניוטון את החוק השלישי שלו:

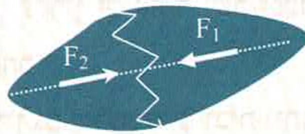
גופים בטבע משפיעים זה על זה בכוחות השווים בגודל ומנוגדים בכיוון.



אם גוף 1 מפעיל על גוף 2 כוח $F_{1\to2}$ וגוף 2 מפעיל על גוף 1 כוח $F_{2\to1}$, אזי ניתן לרשום שהכוחות שווים בגודל: $F_{1\to2} = F_{2\to1}$

ומנוגדים בכיוון, כמו גם הפועלים בקו ישר אחד שמקשר ביניהם:

$$F_{1\to2} \uparrow\downarrow {}_{2\to1}$$



עבור ניוטון החוק השלישי נבע ישירות מן החוק השני. ההוכחה הייתה פשוטה: נניח ששני גופים מרכיבים גוף אחד, גדול יותר (תרשים). עקב ההשפעה ההדדית בין הגופים הם מפעילים כוחות זה על זה: $F_{2\to1}$ ו- $F_{1\to2}$. כוחות אלו חייבים להיות שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, וכמו כן לפעול לאורכו של הקו הישר המחבר ביניהם.

ההוכחה היא על דרך השלילה. נניח שהכוחות אינם שווים או/ו אינם פועלים בקו ישר המחבר ביניהם או/ו אינם מנוגדים. בכל אחד מן המקרים הכוחות לא יבטלו זה את זה, ועל הגוף המורכב יפעל כוח שקול שאינו שווה לאפס. עקב פעולת כוח זה הגוף יהיה חייב להאיץ (לפי החוק השני). כלומר, אנו נצפה במצב מוזר, בו הגוף ינוע (או יאיץ) מבלי שפועל עליו כוח חיצוני. המציאות מעידה על כך שזה לא קורה. לכן זוהי הוכחה לטענת ניוטון הידועה בשם: החוק השלישי של ניוטון.

כאמור, הכוחות מופיעים בזוגות, אך לא תמיד אנו שמים לב לקיום של שניהם. כך למשל, כאשר אנו זורקים כדור ברזל קדימה, כדאי לשים לב לתחושת הרתע לאחור אותה אנו חשים. זהו הכוח השני. מוכרות גם תמונות של ירי תותחים, כאשר בעקבות הירי נרתע כל התותח לאחור באופן ברור ואף מסוכן לאלה העומדים לידו. שוב, הרתע לאחור הוא העדות לכך שהכוחות בפעולת הגומלין מופיעים בזוגות.

לעתים קרובות מכונה החוק – חוק הפעולה והתגובה. ניסוח זה יכול להיות בעייתי: מי מבין הגופים הוא הפועל ומי הוא המגיב? ניוטון טוען, שבטבע לא ניתן לקבוע הבדל בין הכוחות. המונחים פעולה ותגובה באו מחיי היום-יום, כאשר אנו יוזמים פעולה כלשהי וצפויים לתגובה. כך כאשר הפעולה היא תשלום ארנונה התגובה היא מתן שירותים על ידי העירייה. אך כולנו יודעים שבחיים לעיתים פעולה ותגובה מסוג זה לא תמיד שוות (אנשים אחדים אינם משלמים מיסים אך בכל זאת מקבלים שירותים מן העירייה). להבדיל מכל המקרים האחרים, חוק ניוטון טוען ליחס גומלין בין הכוחות הבסיסיים בטבע ולא בין כוחות אחרים.

יותר מכך, חשוב להבין ששוויון הכוחות בפעולה הדדית בין הגופים אינו מלווה בשוויון בתוצאות הפעולה לגבי כל אחד מן הגופים. כך למשל, בהתנגשות בין שתי מכוניות (שלדאבוננו מתרחשת בכבישים) על כל אחת מביניהן פועל בדיוק אותו גודל של כוח. לא כך היא מידת הנזק הנגרם. דהיינו, אם משאית כבדה וגדולה מתנגשת במכונית קטנה ושבירה, אזי למרות **השוויון בין הכוחות** הפועלים על המכונית והמשאית, התוצאות של ההתנגשות, הנזק הנגרם, אינם דומים כלל וכלל. חוזק המבנה של הגוף יקבע את מידת הנזק. אותה בעיטה בדיוק יכולה להעיף כדור במהירות גבוהה, ואף לפוצץ אותו אך יכולה גם לגרום לשבירת הרגל, כאשר בועטים באבן המונחת על הדרך.



למרות השוויון בגודל הכוחות, שהגופים מפעילים זה על זה, התוצאות יכולות להיות שונות לחלוטין וללא שום קשר לשאלה, מי מבין הגופים יזם את הפעילות.

ולבסוף נציין גם, שהחוק השלישי קובע, שהכוחות בפעולה הדדית מכוונים בקו ישר המחבר ביניהם,

אבל איזה קו ישר? הרי בין גופים בעלי ממדים ניתן להעביר אינסוף קווים שונים... לכך אין החוק נותן מענה. כאמור קבע ניוטון את החוקים כאשר למד על תנועת כוכבי הלכת. המציאות במערכת השמש היא שמימדי הגופים (השמש וכוכבי הלכת) הם קטנים בהרבה מן המרחקים ביניהם, ולכן אין משמעות לשאלה באיזה קו פועל הכוח. למען הדיוק יש לציין אם כן, שהחוק טוען לגבי פעולה הדדית בין גופים קטנים מאוד לעומת המרחק שביניהם.

חוקי ניוטון אינם מובנים מאליהם! הייתה זו הברקה מיוחדת של מיטב המוחות של האנושות, לאחר שנים רבות של מחקרים ומאמצים, עד שהביאו לגילוי חוקי



עתה נוכל לסכם את כל חוקי ניוטון המהווים בסיס לפיזיקה הקלאסית כולה:

I. כל גוף מתמיד במצב תנועתו במהירות קבועה בקו ישר או במנוחה, עד אשר כוח חיצוני מאלץ אותו לשנות את מצב תנועתו.

החוק הראשון של ניוטון הוא החוק הכללי ביותר.

II. תאוצת התנועה של כל גוף נמצאת ביחס ישר לכוח הפועל עליו וביחס הפוך למסתו.

החוק השני של ניוטון הוא העידון של החוק הראשון.

III. גופים בטבע משפיעים זה על זה בכוחות השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. הם מכוונים לפי הקו הישר בין הגופים.

החוק השלישי של ניוטון הוא המסקנה מהחוק השני.

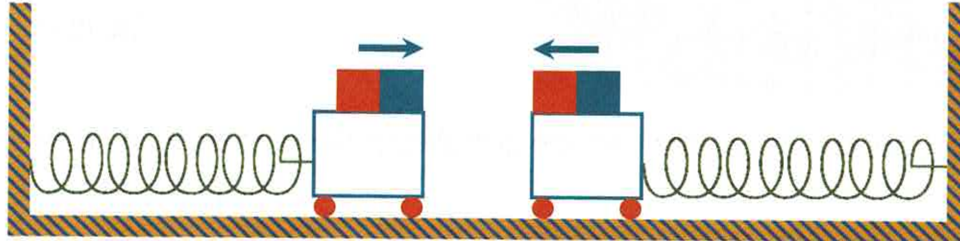
- החוקים של ניוטון היו מנוסחים עבור **גופים קטנים מאוד** לעומת המרחקים שביניהם. הפעלתם של החוקים על גופים, אשר הממדים שלהם דומים למרחקים שביניהם, היא אפשרית, אך לעתים דורשת טיפול נוסף כגון: חלוקת הגוף לחלקים קטנים (עבורם החוקים קבילים) וסיכום התוצאות.

- חוקי ניוטון מבוססים על כך שהשפעתם של גופים שונים בלתי תלויה זו בזו. זהו **עקרון הסופרפוזיציה** של כוחות הפועלים בין גופים בטבע. עקרון זה מקבלים רק על סמך הניסיון.

הדגמות לדיון בכיתה

הדגמה I

קחו שתי עגלות זהות והניחו על כל אחת מהן מגנט זהה, כך שתתקבל משיכה בין העגלות. הצמידו את העגלות באמצעות קפיצים זהים לעמודים קבועים (תרשים).



א. האם המגנט הראשון מפעיל כוח על המגנט השני או ההיפך?

ב. האם הקפיצים מתארכים במידה שווה?

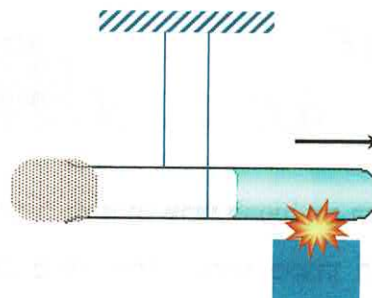
ג. האם תוכל להסיק מניסוי זה, מהו הכוח שכל גוף מפעיל על הגוף האחר?

הדגמה II

קחו מבחנה סגורה ובה מעט מים, התלויה על שני חוטים כמתואר בתרשים. חממו את המים שבמבחנה, עד שהפקק יועף מהמבחנה.

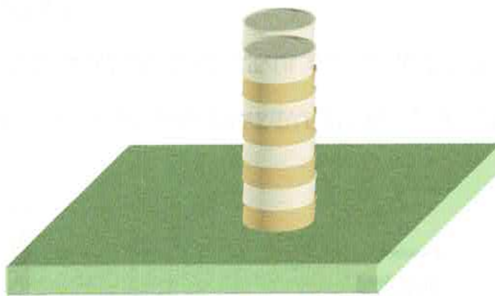
לאיזה כיוון עף הפקק ולאיזה כיוון נרתעת המבחנה?

א. מה תוכל להסיק על הכוח שפעל בין הפקק למבחנה?

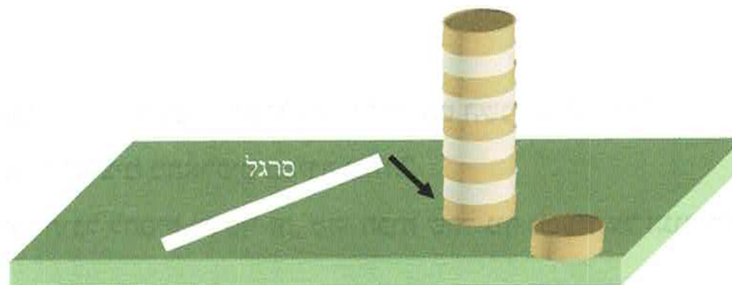


הדגמה III

א. העמידו כ- 10 דסקיות ממערכת האלסטיות זו על גבי זו. נסו להוציא את הדסקית התחתונה ביותר, מבלי ששאר הדסקיות ייפלו. האם הצלחתם?



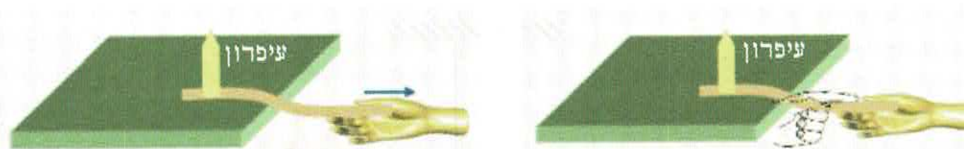
ב. הצמידו סרגל באורך של 30 ס"מ לשולחן, ותנו מכה קלה לדסקית התחתונה. האם שאר הדסקיות נפלו?



חזרו על הניסוי, אלא שהפעם תנו מכה חזקה ומהירה. האם שאר הדסקיות נפלו הפעם? אם כן, תנו מכה מהירה יותר. כאשר תצליחו לא להפיל את הדסקיות, הסבירו מדוע הדסקיות לא נפלו על סמך חוקי ניוטון.

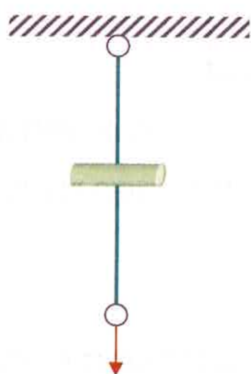
הדגמה IV

הניחו דף נייר באורך של כ-20 ס"מ וברוחב של 3 ס"מ על השולחן. העמידו עפרון (מרקר רחב) על דף הנייר, כשחודו של העיפרון הוא כלפי מעלה.



פעם אחת נסו למשוך את דף הנייר באיטיות מבלי להפיל את העיפרון. בפעם השנייה נסו להוציא את הנייר במכה חזקה, כאשר אתם אוחזים בקצהו החופשי של הנייר. באיזה מקרה הצלחתם להוציא את דף הנייר מבלי שהעיפרון ייפול? נסו להסביר מדוע- על סמך חוקי ניוטון.

הדגמה V

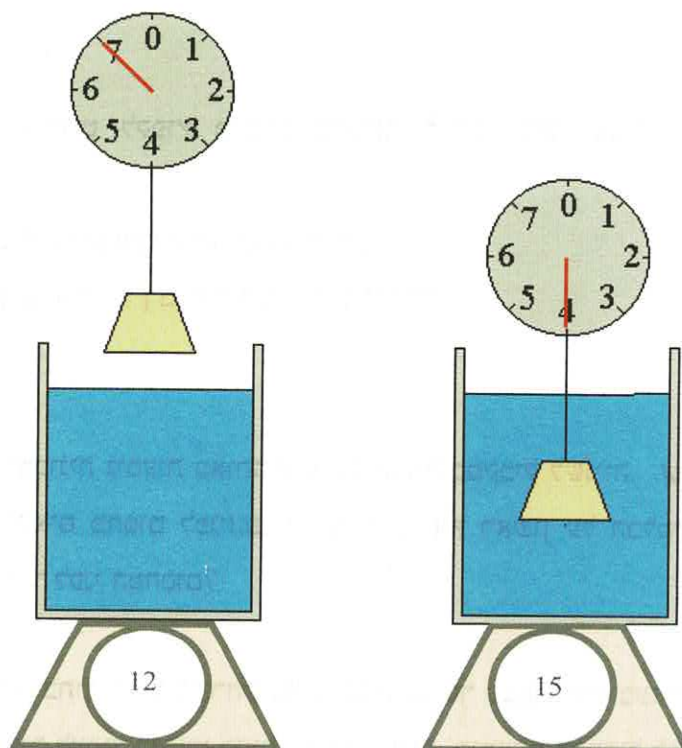


קחו משקולת של 3N וקשרו אותה בעזרת חוט דק לוו עליון. קחו חוט נוסף וחברו גם אותו למשקולת. משכו את החוט התחתון בכוח קטן ובאיטיות למטה, עד שאחד מן החוטים ייקרע.

חזרו שנית על הניסוי, כאשר תמשכו את החוט בכוח ובמהירות. איזה חוט נקרע במקרה הראשון ואיזה במקרה השני? נסו להסביר את הסיבה לכך על סמך חוקי ניוטון.

הדגמה VI

קחו גוש פלסטלינה ותלו אותו על מד כוח, ורשמו את קריאתו. הניחו כלי על מאזניים ומלאו את הכלי עד מעל למחציתו במים (תרשים). רשמו את קריאת המאזניים במצב זה. עתה, טבלו את גוש הפלסטלינה במים.



א. האם קריאת המאזניים עלתה? אם כן, בכמה?

ב. האם קריאת מד הכוח ירדה? אם כן, בכמה?

ג. מה ניתן להסיק מהתוצאות שקיבלת בסעיפים א' ו- ב'?





1. הסבירו בעזרת חוקי ניוטון את תפקידם של חגורת הבטיחות ומשענת הראש ברכב.

2. מכונית הנמצאת במנוחה מתחילה להאיץ, ואחרי כן נעה במהירות קבועה. לאחר נסיעה המכונית בולמת ונעצרת. תארו את מה שקורה לנהגת בכל אחד ממצבי התנועה.



3. אדם, שאזל הדלק ממכוניתו, מנסה לדחפה על כביש חלק ורטוב. האם יצליח? נמקו.



4. תלמיד מחליט לקפוץ מרכבת בהגיעה לתחנה לפני עצירתה המוחלטת.

א) הסבירו מדוע מעשה זה מסוכן מאוד.

ב) האם עדיף לקפוץ בכיוון התנועה או כנגדה?

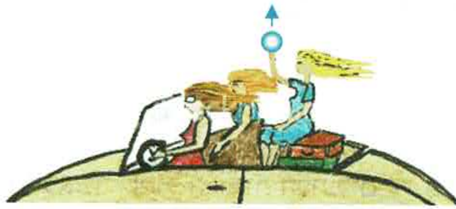


5. משאית ומכונית נוסעות באותה מהירות האחת במקביל לשנייה. שני הנהגים רואים מחסום לפניהם. מי צריך ללחוץ ראשון על הבלמים בכדי לעצור לפני המחסום?



6. אדם נמצא בתוך סירה במרחק מה מהחוף, ומושך עצמו לחוף בעזרת חבל הקשור לעמוד הנמצא בחוף. סירה שנייה, הנמצאת במקביל לה, נמשכת ע"י אדם, הנמצא בחוף, באותו הכוח כמו שנמשך האדם שבסירה הראשונה. האם שניהם יגיעו יחד לחוף?

7. תלמידה הנוסעת ברכב זורקת כדור כלפי מעלה. היכן ייפול הכדור אם:



א) המכונית נוסעת במהירות קבועה,

ב) המכונית מאיצה,

ג) המכונית מאיטה.

8. הסבר/י בעזרת החוק השלישי של ניוטון:



א) מדוע מסתובבת הממטרה כאשר היא מפזרת מים?

ב) כיצד מצליחות ציפורים לעוף?

ג) כיצד נע מטוס סילון אשר שולח לאחור זרימה חזקה של גזים?

9. שחקן כדור- רגל דוחף שחקן אחר על משטח דשא חלק.



א) על מי מן השחקנים פועל כוח גדול יותר?

ב) לאיזה שחקן נגרמת תאוצה גדולה יותר?

10. שתי נערות מושכות חבל.



א. האם שתי הנערות מפעילות אותו כוח על החבל? הסבירו!

ב. האם כוחות אלה הם פעולה ותגובה? הסבירו!

ג. מהי המתיחות במרכז החבל? הסבירו!

11. כדור נזרק כלפי מעלה. בהיותו באוויר, מהי הפעולה ומהי התגובה?

12. נסו להסביר את תהליך ההליכה האנושית, כאשר אתם מסתמכים על חוק השלישי של ניוטון.



שאלות הבנה וחשיבה- לדיון בכיתה

1. כאשר שקול הכוחות הפועלים על גוף מסוים שווה לאפס, זה מחייב שהגוף:
   א. נמצא במנוחה.
   ב. נע במהירות קבועה.
   ג. נע בתאוצה קבועה.
   ד. נמצא או במנוחה או בתנועה במהירות קבועה.

2. משאית כבדה נוסעת ומתנגשת במכונית קלה, הנוסעת לקראתה. האם נכון שבזמן ההתנגשות:
   א. המשאית תפעיל על המכונית כוח גדול יותר מזה שהמכונית תפעיל עלי?
   ב. המשאית תפעיל על המכונית כוח קטן יותר מזה שהמכונית תפעיל עליה?
   ג. המשאית תפעיל על המכונית כוח השווה בגודלו לזה שהמכונית תפעיל עליה?
   ד. למכונית ולמשאית ייגרם נזק באותה המידה?

3. אדם יושב ברכבת כאשר היא נעה אופקית ומאיצה בקו ישר. הכוח הגורם לאדם להאיץ יחד עם הרכבת הוא:



   א. כוח הכובד.
   ב. הכוח הנורמלי ממשענת הגב.
   ג. כוח החיכוך עם המושב.
   ד. הכוח הנורמלי ממשענת הגב וכוח החיכוך עם המושב.

4. תלמיד הנמצא בסל של כדור פורח, הנמצא בעלייה , מפיל (לא זורק) כדור.



   האם נכון ש:
   א. התלמיד יראה את הכדור נע כלפי מעלה?
   ב. התלמיד יראה את הכדור נופל חופשית?
   ג. אנשים הנמצאים על הקרקע יראו את הכדור קודם עולה ואחרי כן נופל?
   ד. תשובות ב' ו- ג' נכונות?

5. נהג ברכב נמצא בנסיעה לאחור, ולפתע לוחץ על הבלמים (בלימת חרום). בזמן הבלימה הנוסעים של הרכב:



א. ייזרקו קדימה.

ב. ייזרקו אחורה.

ג. יישארו במקומם, ולא ירגישו בבלימה.

ד. ייצמדו הצידה.

6. מאחר וכוחות בפעולת גומלין בין הגופים שווים זה לזה והפוכים בכיוונם, הם:

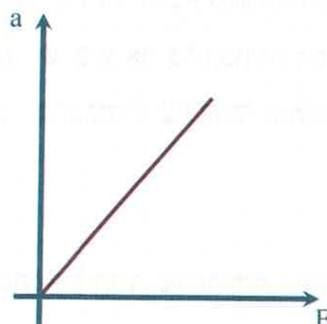
א. מבטלים זה את זה.

ב. אינם מבטלים זה את זה, כי הם פועלים על אותו גוף.

ג. אינם מבטלים זה את זה, כי הם פועלים על גופים שונים.

ד. אינם משפיעים על הגופים.

7. הגרף הבא מתאר את התאוצה הנגרמת לגוף כתוצאה מפעולת כוח משתנה עליו. מגרף זה ניתן להסיק ש:



א. הגוף נגרר על משטח לא חלק.

ב. שיפוע הגרף נקבע על ידי מסת הגוף.

ג. התאוצה נמצאת ביחס הפוך לכוח.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

8. ילד יושב על נדנדה הסובבת, במהירות קבועה. במצב זה שקול הכוחות הפועל על הילד שווה ל:



א. אפס.

ב. משקל הילד.

ג. מתיחות שבחוט.

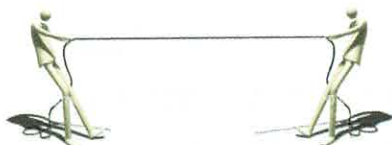
ד. גודל השונה מאפס.



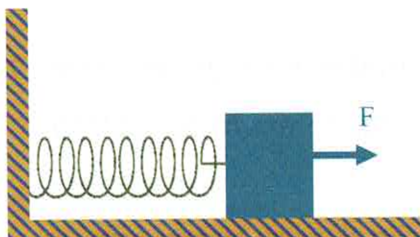
שאלות חישוב



1. מהי המתיחות בחוט, אם ידוע שכוח הכובד הפועל על הגוף שווה ל- 80 ניוטון ?

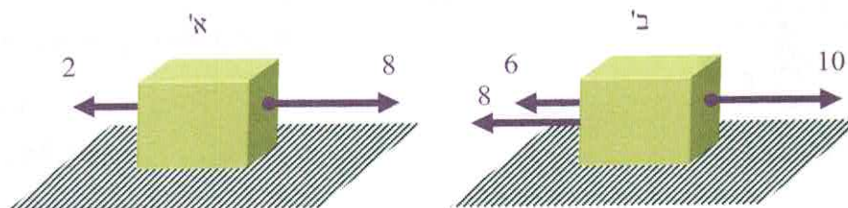


2. שני אנשים מושכים בחבל, כל אחד בכוח של 50 ניוטון. מהי המתיחות בחבל ?



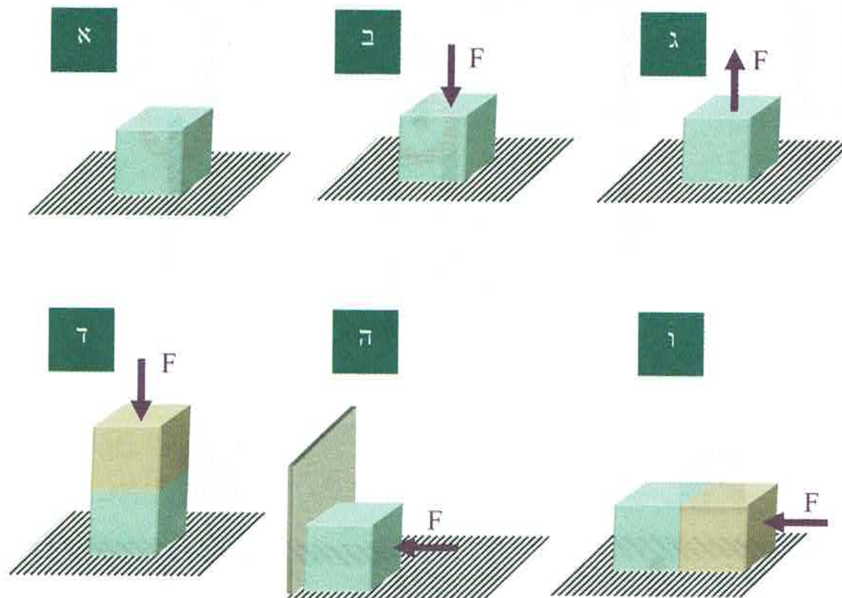
3. כוח F שגודלו 50 ניוטון מושך גוף המחובר לקפיץ. הגוף נמצא במנוחה והמשטח חלק.
   א. שרטטו את כל הכוחות הפועלים על הגוף.
   ב. מהו גודלו של הכוח האלסטי של הקפיץ ?

4. מסתו של הגוף שבתרשים היא 4 ק"ג. מפעילים על הגוף כוחות שונים, כמתואר בתרשימים.
   גודלי הכוחות נתונים ביחידות ניוטון.
   מהי תאוצת הגוף עבור כל אחד מהמצבים?



5. א. העתיקו את התרשימים למחברתכם, והוסיפו לכל אחד מהשרטוטים חיצים, המתארים את כיווניהם של כל כוחות התגובה של המשטחים, הפועלים על כל אחד מהגופים. (כל המשטחים חלקים).

ב. חשבו את גודלם של כוחות התגובה האלסטית, אם ידוע שכוח הכובד הפועל על הגוף הוא 20 ניוטון, וגודלו של הכוח F הוא גם כן 20 ניוטון.



6. מסתו של הגוף שבתרשים היא 2 ק"ג. מפעילים על הגוף כוחות שונים, כמתואר בתרשימים.

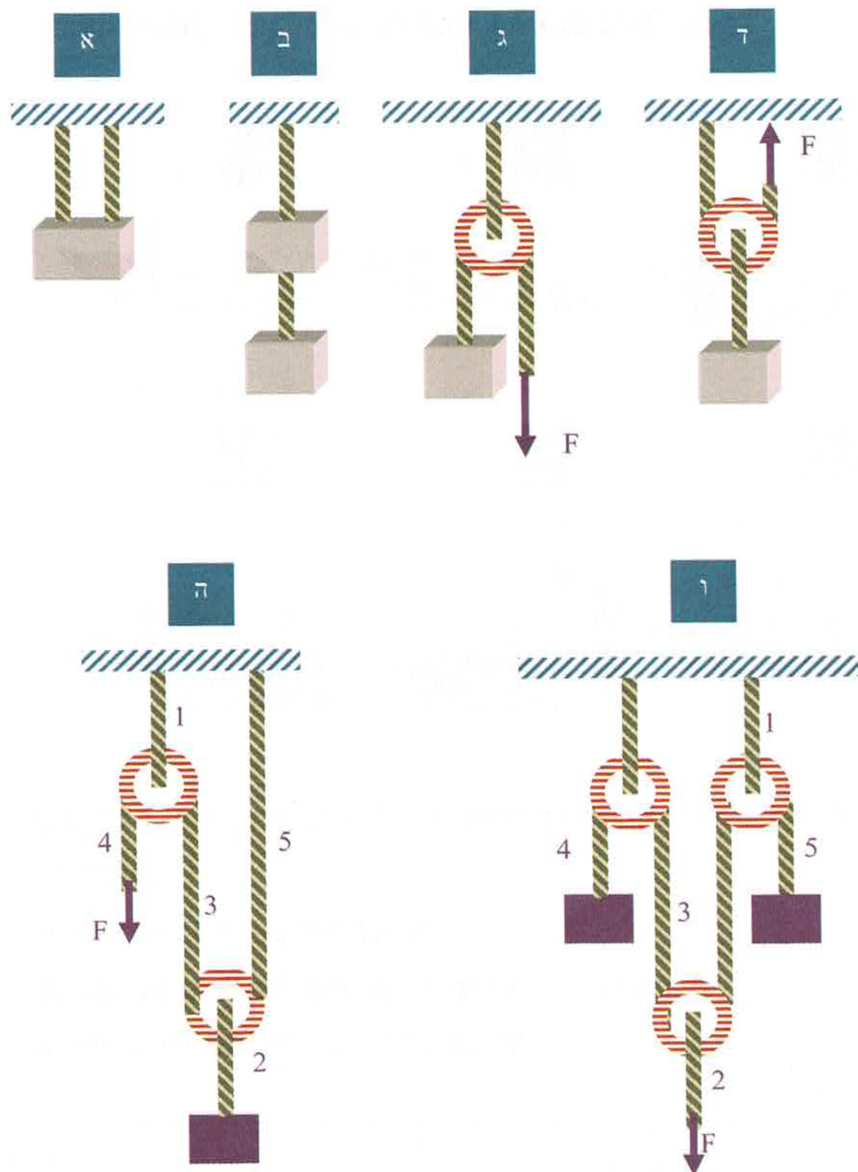
גודלי הכוחות נתונים ביחידות ניוטון.

א. חשבו את גודלו של הכוח השקול עבור כל אחד מהמצבים.

ב. מהי תאוצת הגוף עבור כל אחד מהמצבים?

הכוחות הפועלים	3, 8	3, 5	1, 2
הכוח השקול			

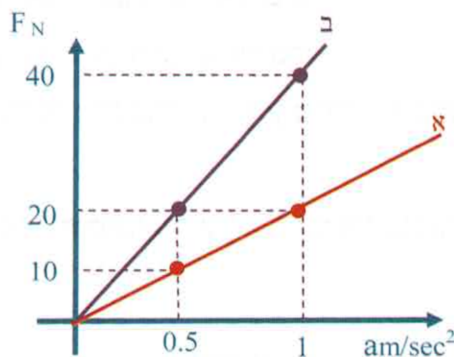
7. בכל אחד מהשרטוטים מתוארת מערכת בעלת מספר חוטים הנמצאת במנוחה. מצא את המתיחות בכל אחד מהחוטים ואת גודלו של הכוח F, אם ידוע שכוח הכובד, הפועל על כל אחד מהגופים, הוא 60 ניוטון ?



8. הגרף שלפניכם מתאר את הכוח הפועל על שני גופים שונים כפונקציה של התאוצה.

א. מצאו את המסה של כל אחד מהגופים.

ב. מה תהיה התאוצה של כל אחד מהגופים, כשיפעל עליו כוח של 50N ?





9. שני בולי עץ זהים, הקשורים בעזרת חוט, מורמים כלפי מעלה ע"י כוח F במהירות קבועה.

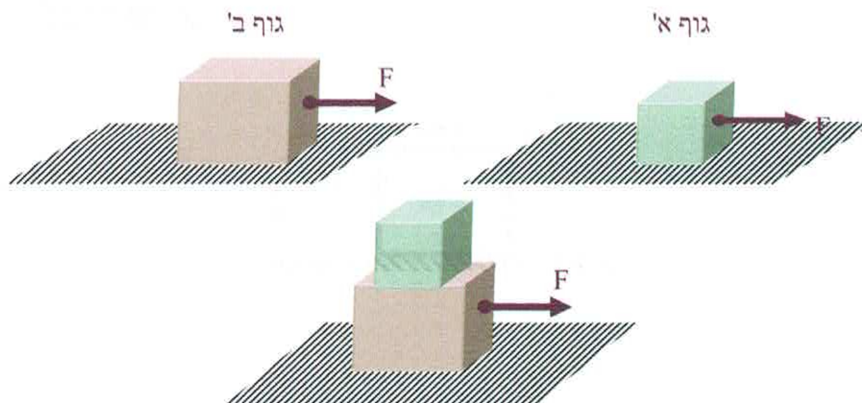
א. מה גודל המתיחות בחוט, המקשר בין הבולים, אם ידוע, שעל כל אחד מהבולים פועל כוח כובד של 10 ניוטון ?

ב. מהו גודלו של הכוח F ?

10. מסתו של גוף א' - 4 ק"ג ושל גוף ב' – 12 ק"ג. מפעילים על כל אחד מהגופים כוח זהה של 24N.

א. מה תהיה תאוצת כל אחד מהגופים?

ב. מדביקים את שני הגופים. מה תהיה תאוצתם המשותפת, כאשר פועל אותו כוח?



11. כוח אופקי $F= 80\ N$ מושך במשך 10 sec תיבה שמסתה 4 kg, העומדת במנוחה על משטח חלק, לפני תחילת פעולת הכוח.

א. מהי תאוצת התיבה בזמן פעולת הכוח?

ב. מהי תאוצת התיבה לאחר הפסקת פעולת הכוח?

ג. מהי המהירות המכסימלית אליה הגיעה התיבה?

ד. שרטטו את גרף התאוצה כפונקציה של הזמן מתחילת התנועה ועד 20 sec מתחילת התנועה.

ה. שרטטו את גרף המהירות כפונקציה של הזמן מתחילת התנועה ועד 20 sec מתחילת התנועה.



12. כוח שקול אופקי של 8 N בכיוון ימין מתחיל לפעול על גוף שמסתו 2 kg ומהירותו 4 m/sec בכיוון שמאל.

א. תארו במילים את צורת התנועה של הגוף.

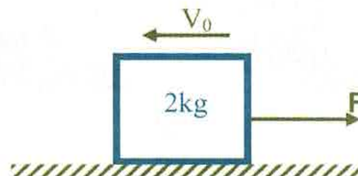
ב. מהי תאוצת הגוף?

ג. תוך כמה זמן מרגע התחלת פעולת הכוח ייעצר הגוף?

ד. תוך כמה זמן מרגע התחלת פעולת הכוח תהיה המהירות 2 m/sec ימינה?

ה. תוך כמה זמן מרגע התחלת פעולת הכוח יחזור הגוף לנקודת התחלת פעולת הכוח?

ו. שרטט/י את גרף המהירות כפונקציה של הזמן מתחילת התנועה ועד לחזרת הגוף לנקודת המוצא.



13. לפניך גרף של כוח שקול, הפועל על גוף, שמסתו 5 kg, כפונקציה של הזמן. הגוף נמצא במנוחה לפני תחילת פעולת הכוח.



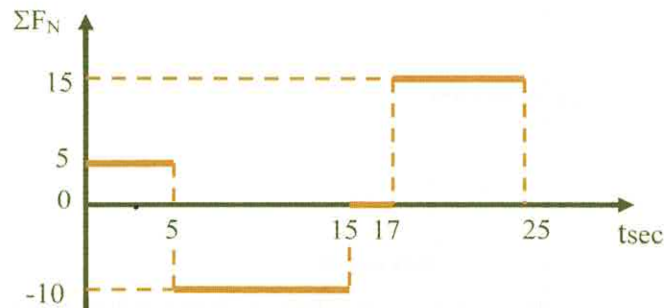
א.תארו במילים את תנועת הגוף בכל אחד מארבעת השלבים של התנועה.

ב.מהי התאוצה בכל אחד מהשלבים של התנועה?

ג. שרטט/י גרף של המהירות כפונקציה של הזמן.

ד.מהי המהירות לאחר: 5 sec (1) 25 sec (2) ?

ה.מהו ההעתק לאחר: 5 sec (1) 25 sec (2) ?



14. כוח של 80 N דוחף שתי מסות צמודות זו לזו על גבי משטח חלק (ראה תרשים א') .



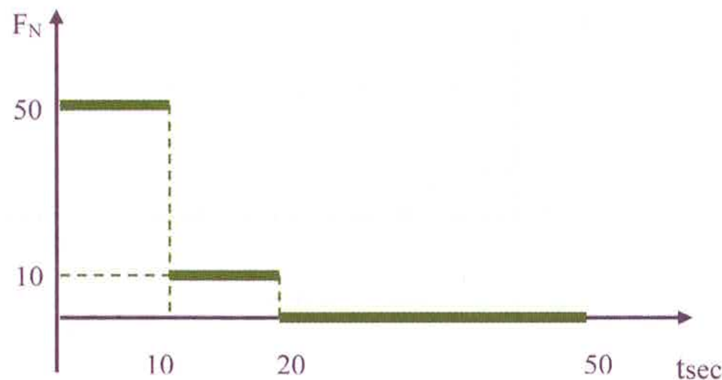
א. מהי תאוצת המסות בזמן פעולת הכוח? (תרשים א')

ב. מהו הכוח שמפעיל כל גוף על הגוף השני בהנחה שאין חיכוך עם המשטח?

ג. האם תשובותיכם לסעיפים א ו-ב ישתנו, אם הכוח יפעל על המסה הימנית? (ראו תרשים ב')

15. כוח F גורר גוף שמסתו $m=2kg$ אופקית ימינה. בתחילת פעולת הכוח הגוף היה במנוחה. כוח מתנגד קבוע f בן 20N פועל שמאלה כל הזמן גם כאשר הכוח F חדל לפעול.





הגרף מתאר את השתנות הכוח F כפונקציה של הזמן.

(הכיוון ימינה נבחר כחיובי).

א. ערכו תרשים כוחות, הפועלים על הגוף, עבור כל אחד משלושת השלבים של תנועתו, וחשבו את התאוצה בכל שלב.

ב. סרטטו גרף של המהירות כפונקציה של הזמן עבור 50 שניות ראשונות של תנועתו.

ג. האם במהלך תנועתו הגוף שינה את כיוון תנועתו ?

אם כן – מתי זה קרה, וכמה מטרים ימינה התקדם עד אז הגוף?

אם לא – חשב כמה מטרים התקדם הגוף.

ד. מה הייתה מהירותו הממוצעת של הגוף ב-50 השניות הראשונות של תנועתו?

ה. כעבור כמה זמן מרגע $t=50$ sec היה הגוף חוזר למקום מוצאו, בהנחה שהכוח F עדיין שווה לאפס?

תשובות

1. 80N

2. 50N

3. ב. 50N

4. א. $1.5m/s^2$ ב. $-1m/s^2$

5. א. 20N ב. 40N ג. 0 ד. מהרצפה 60N, בין הגופים 40N
ה. 20N ו. בין הגופים 10N, מהרצפה 20N.

6. א. 11N, 2N, 1N ב. $5.5m/s^2$, $5.5m/s^2$, $0.5m/s^2$.

7. א. 30N ב. 60N, 120N ג. 60N, 120 N ד. 60N, 30N
ה. 1,2 - 60N. 3,4,5 - 30N ו. 1,2 - 120N. 3,4,5 - 60N.

8. א. 40kg, 20kg ב. $1.25m/s^2$, $2.5m/s^2$

9. א. 10N ב. 20N

10. א. $6m/s^2$, $2\ m/s^2$. ב. $1.5m/s^2$

11. א. $20m/s^2$ ב. 0 ג. 200 m/s

12. א. הגוף נע שמאלה בתאוטה, נעצר, ואז מאיץ ימינה ב. $4\ m/s^2$
ג. 1 s ד. 1.5 s ה. 2 s

13. ב. $1\ m/s^2$, $-2\ m/s^2$, 0, $3\ m/s^2$ ד. 1) 5m/s 2) 9 m/s
ה. 1) 12.5m 2) -91.5 m

14. א. $8\ m/s^2$ ב. 32 N ג. א) לא, ב) כן, 48 N

15. א. $a_1=15\ m/s^2$, $a_2=-5\ m/s^2$, $a_3=-10\ m/s^2$
ג. כן - 30s, 2500 m ד. 10 m/s ה. 2.36 s

פרק ה' - תנע ומתקף

החוק הראשון של ניוטון מתאר את תכונת ההתמדה של הגופים: שאיפתם להישאר במצב מנוחה או תנועה במהירות קבועה. אלה הם המצבים הטבעיים של כל גוף. מתברר, שהגודל המאפיין את מצב התנועה של הגוף הוא "**כמות התנועה**" או "התנע" (נסמן את התנע באות p). בעקבות השפעת כוח חיצוני הגוף משנה את מצבו, כלומר משנה את התנע שלו.

מחיי היום יום שלנו אנו יודעים, שבמשחקי כדור קשה יותר לעצור כדור, המגיע אלינו במהירות גבוהה, מאשר במהירות נמוכה. מכאן טבעי לקבל את הטענה, שכמות התנועה של הגוף מתכונתית למהירותו:

$$p \propto V \quad (1)$$

ידוע גם, שלעצור שחקן מסיבי, הנמצא בריצה, קשה יותר, מאשר לעצור ילד, הנמצא בריצה, אפילו אם הם רצים במהירות שווה. כלומר גם מסת הגוף תורמת לכמות התנועה של הגוף הנע:

$$p \propto m \quad (2)$$

שתי התנסויות אלה עוזרות לקבל את ההגדרה עבור כמות התנועה, או התנע, של הגוף:

$$p = m \cdot V \quad (3)$$



מהירות התנועה ומסת הגוף הנע קובעים את "כמות התנועה", או התנע, של הגוף הנע.

מתוך הגדרת התנע (3) נקבע את היחידות בהן נמדד התנע:

$$[p] = [m] \cdot [V] = kg \cdot \frac{m}{sec} \quad (4)$$

לפי הגדרה (3) ברור שתנע הוא גודל, שבדומה למהירות, תלוי בכיוון התנועה. כך לדוגמה, לכדור הנע במהירות v שמאלה יהיה תנע הפוך לעומת מצב תנועתו ימינה באותה מהירות.



ובאופן כמותי יהיו גדלי התנעים:

$$p_1 = mv_1 \qquad p_2 = mv_2$$

ואם מדובר רק בשינוי כיוון יהיה: $v_1 = -v_2$ ולכן: $p_2 = -p_1$. במקרה כזה השינוי בתנע של הכדור יהיה:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -2p_1 = -2mv_1$$

כאמור, בעקבות ההשפעה של הכוח המופעל על הגוף, משתנה מצב תנועתו: התנע של הגוף. מתברר, שהשפעה זו עולה יחד עם גודל הכוח ועם משך פעילותו:

$$\Delta p \propto F \cdot \Delta t \qquad (5)$$

החוק השני של ניוטון קובע, שהקשר הזה הוא קשר ישר, וניתן לרשום אותו באופן:

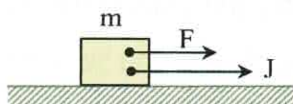
$$\Delta p = F \cdot \Delta t \qquad (6)$$

צורה זו של החוק רומזת, שאת השפעת הכוח על מצבו של הגוף כדאי לאפיין על ידי גודל מיוחד, המכונה **מתקף**. גודל זה מוגדר כמכפלה:

$$J = F \cdot \Delta t \qquad (7)$$



מתקף הוא המונח למכפלה של הכוח בפרק הזמן בו פעל הכוח.



הגדרת המתקף (7) מעידה על כך, שגודל זה, בדומה לכוח, תלוי בכיוון, ויש להבחין בכיוון פעולתו עבור כל מקרה.

קל להיווכח, שאין זה קשה, כי כיוון המתקף זהה לכיוון פעולת הכוח.

את ניסוח (6) החוק השני של ניוטון ניתן לכן לבטא באופן הבא:

$$\Delta p = J \qquad (7)$$

כלומר החוק השני של ניוטון טוען:



מתקף גורם לשינוי בתנע (בכמות התנועה) של הגוף.

דווקא בצורה דומה לזו ניסח ניוטון את החוק השני בשנת 1687, כאשר פרסם את תורתו החדשה במכניקה.

עתה נקשור צורה זו של החוק לצורה שנלמדה קודם:

$$F = m \cdot a \qquad (8)$$

בתוך ביטוי (8) נפרט את גודל התאוצה בהתאם להגדרתה: $a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$. נזכיר ש- v_1 היא מהירות הגוף בזמן t_1 ו- v_2 היא מהירות הגוף בזמן t_2. אם נסמן את הפרש הזמנים ב- Δt נקבל:

$$F = m \cdot \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

ביטוי זה ניתן להציג באופן הבא:

$$F \cdot \Delta t = m \cdot v_2 - m \cdot v_1$$

קל לראות שכך קיבלנו את ביטוי (7):

$$F \cdot \Delta t = p_2 - p_1 = \Delta p$$

צורה (8) של החוק השני הוכנסה לשימוש על ידי המתמטיקאי השווייצרי הדגול אוילר, כמובן אחרי ניוטון, וצורה זו מוכרת יותר כיום. עם זאת, שני הביטויים עבור החוק השני דומים מאוד, ורק משתמשים במונחים שונים. כלומר את התהליך של שינוי במצב התנועה של הגוף ניתן לבטא גם על ידי האמירה:

(I) "עקב השפעת כוח מצד גוף אחד גוף שני בעל מסה m מואץ בתאוצה a",

אך גם על ידי האמירה:

(II) "מתקף של כוח מסוים גורם לשינוי בתנע של הגוף, עליו הופעל הכוח".

לשתי הטענות משמעות קרובה. עם זאת קיימת משמעות ייחודית לכל תיאור:

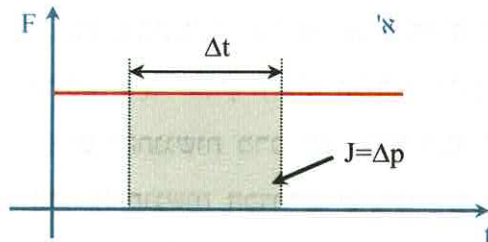
טענה I וביטוי (8) מבטאים את המצב ברגע מסוים: אותו רגע, בו משפיע הכוח, תאוצה הגוף היא בעלת גודל מסוים. תיאור זה הוא תיאור **רגעי**.

לעומת זאת, טענה (II) וביטוי (7) מסכמים את השינוי במצב תנועתו של הגוף, שחל לאחר פרק זמן מסוים. התיאור השני הוא תיאור **מסכם**. על סמך התיאור המסכם, למשל, ניתן להבין, שאת השינוי במהירות יכול לגרום כוח גדול במשך פרק זמן קצר, וגם כוח קטן יותר, הפועל במשך זמן ארוך יותר, כך שהמתקף של הכוח יהיה שווה בשני המקרים.



$F = m \cdot a$ הוא החוק השני של ניוטון **בתיאור רגעי**

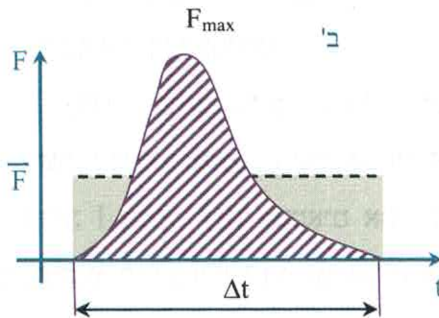
ו- $\Delta p = J$ הוא החוק השני של ניוטון **בתיאור מסכם**



היות והמתקף מספק תיאור מסכם של התנועה, כדאי להציג את השפעתו על התנועה באופן גרפי, באמצעות התלות בזמן. גרף א', למשל, מתאר פעולת כוח קבוע. המתקף המופעל על הגוף במשך פרק הזמן Δt מיוצג בגרף זה על ידי השטח הכלוא מתחת לקו האופקי, המייצג את הכוח. לפי החוק השני של ניוטון, שטח זה מייצג גם את השינוי בתנע של הגוף.

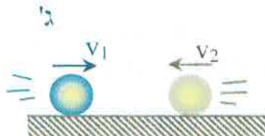
ברור שבמציאות השפעת הכוחות משתנה עם הזמן. נדגים מקרה עבור כוח הפועל על גופו של נהג, החגור בחגורת בטיחות בזמן הבלימה של המכונית. גרף התלות של הכוח בזמן מיוצג באופן מקורב על ידי גרף ב'.

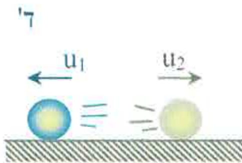
גם במקרה כזה נשארת בתוקף התכונה של הגרף, הקושרת את השטח שמתחת לגרף עם המתקף שפעל על הגוף, השווה גם לשינוי בתנע של הגוף . לצורך חישוב קל יותר ניתן להחליף את השטח שמתחת לעקומה במלבן בעל אותו שטח. את גובהו של מלבן כזה מייצג הכוח הממוצע $\overline{F}$.



ברור שהחלפתו של F ב- $\overline{F}$ אינה טובה לכל מטרה. כך למשל בתכנון של חגורת הבטיחות חשוב לקחת בחשבון גם את הכוח המקסימאלי F_{max}, הקובע את מידת הנזק לגופו של הנהג.

חוק שימור התנע





מושג התנע (או כמות התנועה) מאפשר פענוח תופעות רבות, המתרחשות למול עינינו. זאת בעיקר הודות לתכונה המיוחדת של גודל פיזיקאלי זה, המתבטא באופן בולט בסוגים שונים של ההתנגשויות בין גופים, בהתפוצצויות ובתהליכים פיזיקאליים שונים, שהמשותף לכולם הוא השינוי במצב התנועה של הגופים המעורבים.

נדגים התנגשות על ידי שני כדורים בעלי גודל שווה, הנעים זה לקראת זה בקו ישר (תרשים ג'). במקרה כזה הכוחות פועלים לאורך הקו, המחבר בין מרכזי המסות של הגופים (התנגשות מרכזית). שני הכדורים נעים זה לקראת זה במהירויות v_1 ו- v_2. לאחר ההתנגשות הכדורים ימשיכו לנוע במהירויות u_1 ו- u_2 (תרשים ד'). הכדורים פועלים זה על זה בכוחות שווים בגודל ומנוגדים בכיוון (החוק השלישי של ניוטון), אותם נסמן ככוחות F_1 ו- F_2. היות והכוחות פועלים במשך אותו פרק זמן, הרי מתקיים:

$$F_1 \cdot \Delta t = -F_2 \cdot \Delta t \qquad (9)$$

כלומר: על הגופים פעל אותו גודל של מתקף, ולכן גם שווים בגודל השינויים בתנע של הגופים.

$$\Delta p_1 = -\Delta p_2 \qquad (10)$$

נפרט את שינויי התנע ונקבל:

$$m_1u_1 - m_1v_1 = -(m_2u_2 - m_2v_2) \qquad (11)$$

ולאחר סידור האיברים בביטוי (11) נקבל:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2 \qquad (12)$$

שוויון זה פירושו, שסכום כמויות התנועה (התנעים) נשאר קבוע לפני ההתנגשות ולאחריה. טענה זו מהווה ביטוי של חוק שימור התנע. באגף השמאלי של המשוואה מצויים התנעים של הגופים לפני ההתנגשות, ובאגף הימני – לאחר ההתנגשות.

ובאופן כללי יותר ניתן לטעון ש:



התנע הכולל של מערכת גופים נשאר קבוע בזמן ההתנגשות בין הגופים.

נציין, שתקיפות הטענה לגבי שימור התנע בהתנגשות בין גופים, מבוססת על כך, שפרק הזמן בו מתרחשת ההתנגשות הוא קצר מאוד, ושום כוח אחר הפועל על הגופים מגופים אחרים ("הכוח החיצוני") לא מספיק להשפיע ולשנות את התנע של הגופים המתנגשים. כאלה הם למשל כוח חיכוך, כוח הכובד, הכוח הנורמלי ואחרים. חוק שימור התנע מתקיים גם אם בהתנגשות משתתפים יותר משני גופים.

בכל סוגי ההתנגשות בין הגופים חל עיוות בצורתם. עם זאת בפיזיקה מבחינים בין שני סוגי התנגשויות קיצוניים: התנגשות **אלסטית** והתנגשות **פלסטית**. במקרים אלה תיאור ההתנגשות הוא פשוט במיוחד:

בהתנגשות **אלסטית** הגופים חוזרים לצורתם המקורית לאחר ההתנגשות. כאלה הן התנגשויות של כדורי פלדה, כדורי גומי וכדומה (תרשימים ג' ו-ד'). כאמור, מהירויות הגופים המתנגשים תואמות לחוק שימור התנע וניתן לרשום את משוואה (12) עבורן:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2$$

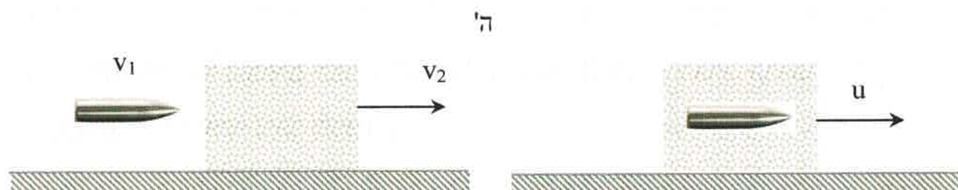
לעומת זאת בהתנגשות **פלסטית** הגופים משנים את צורתם, ואינם חוזרים לצורם הקודמת. יותר מכך, לאחר ההתנגשות הגופים נשארים מחוברים ביניהם. מצב זה מתרחש, למשל, כאשר לפחות אחד מן הכדורים המתנגשים עשוי פלסטלינה. לאחר ההתנגשות הגופים

הנצמדים נעים יחד (תרשים ה'). לפי חוק שימור התנע המהירויות במקרה זה יתאימו למשוואה הבאה:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2) \cdot u$$

כאשר u היא המהירות המשותפת של הגופים לאחר ההתנגשות.

ה'



במציאות כמובן מתרחשות גם התנגשויות המהוות מצבי ביניים בין שני המקרים הקיצוניים, אך סוג ההתנגשות אינו משפיע על השיקולים, שהביאו אותנו לטעון את חוק שימור התנע, ולכן החוק נשאר בתוקף בכל התנגשות. תכונה זו היא בעלת חשיבות גדולה מאוד. בעקבותיה, הפענוח של עקבות מכוניות, אשר התנגשו, נעשה על סמך חוק שימור התנע.



התנגשות אלסטית בין 5 כדורי מתכת



שאלות הבנה וחישוב לדיון בכיתה

1. המתקף שווה ל-
   א. מכפלת הכוח הפועל על גוף במשך הזמן שבו הוא פועל.
   ב. שינוי בכמויות התנועה עקב הפעלת כוח.
   ג. השטח הכלוא מתחת לגרף הכוח בתלות בזמן.
   ד. כל התשובות נכונות.

2. התנע שווה ל-
   א. המתקף שפעל על הגוף.
   ב. מכפלת המסה של הגוף במהירותו.
   ג. שינוי בכמות התנועה של הגוף.
   ד. כל התשובות נכונות.

3. כאשר כוס זכוכית נופלת על הרצפה, היא נשברת לחתיכות, וכשהיא נופלת על מזרן, היא נשארת שלמה. הסיבה לכך היא:

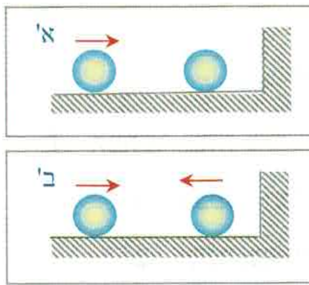


   א. בנפילה על הרצפה על הכוס מופעל מתקף גדול יותר.
   ב. בנפילה על המזרן פועל על הכוס מתקף גדול יותר.
   ג. בנפילה על הרצפה זמן העצירה קצר, ולכן הכוח על הכוס גדול.
   ד. בנפילה על המזרן זמן התקיפה קטן, לכן הכוח על הכוס גדול.

4. הסיבה לכך שקליע, החודר דרך זכוכית, עושה בה חור, אך אינו מנפץ אותה, היא:



   א. זמן התקיפה הקצר מדי.
   ב. הכוח הפועל קטן מדי.
   ג. מסת הקליע הקטנה.
   ד. כל התשובות אינן נכונות.



5. במקרה א' כדור נזרק לעבר קיר ונצמד אליו, ובמקרה ב' הכדור מוחזר באותה המהירות בה פגע בקיר. הנכון הוא ש:

א. בשני המקרים המתקף שהקיר הפעיל על הכדור שווה לאפס.

ב. במקרה א' הקיר הפעיל מתקף גדול יותר על הכדור.

ג. במקרה ב' הקיר הפעיל מתקף גדול יותר על הכדור.

ד. בשני המקרים נגרם לכדור אותו שינוי בתנע.

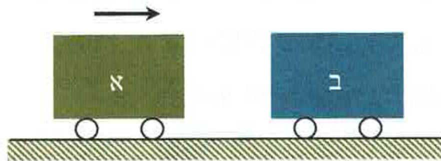
6. חוק שימור התנע מתקיים:

א. בהתנגשות אלסטית.

ב. התנגשות פלסטית.

ג. בהתפוצצות.

ד. בכל סוגי ההתנגשות.



7. קרונית א' נעה במהירות v על גבי מסילה חלקה ופוגעת בקרונית ב', בעלת מסה שווה, המצויה במנוחה. הנכון הוא ש:

א. אם ההתנגשות הייתה פלסטית שתי הקרוניות היו נעות יחד במהירות 0.5v.

ב. אם ההתנגשות הייתה אלסטית קרונית A הייתה נעצרת וקרונית B הייתה נעה במהירות v.

ג. אם ההתנגשות הייתה פלסטית, המהירות היחסית בין הקרוניות הייתה שווה לאפס לאחר ההתנגשות.

ד. כל התשובות נכונות.



8. משאית כבדה מתנגשת במכונית קלה. הנכון הוא ש:

א. על שתיהן פועל כוח שונה.

ב. על המכונית פועל מתקף גדול יותר.

ג. לשתיהן תהיה תאוצה זהה לאחר ההתנגשות.

ד. כל התשובות אינן נכונות.



1. הגדירו מהו מתקף ומהו תנע, מה הקשר ביניהם ובאילו יחידות נמדד כל אחד מהם.
2. הביאו שני נוסחים לחוק שימור התנע.
3. שני רכבים נעים לאורך דרך ישרה. הייתכן שהתנע הכולל שלהם ישווה לאפס?
4. אם ידוע שהכוח, שהופעל על שני פגזים בתוך תותח, הוא זהה, מדוע מהירות הפגז בתותח בעל הקנה הארוך יותר גבוהה מזו שבתותח בעל הקנה הקצר יותר?
5. במשחק כדורגל מתי הכדור הפוגע בשוער מפעיל מתקף גדול יותר: כאשר הכדור נתפס על-ידי השוער, או כאשר הוא נהדף על- ידי השוער? הסבירו!
6. מהו ההבדל בין התנגשות פלסטית להתנגשות אלסטית?
7. הסבירו בעזרת המושגים של מתקף ותנע:
   א. מדוע עדיף ליפול על רצפת עץ מאשר על רצפת בטון?
   ב. מדוע עדיף להושיט את היד קדימה לצורך תפיסת כדור מהיר?
8. שני כדורים זהים נעים זה לקראת זה באותה עוצמת מהירות.
   תארו את תנועת הכדורים לאחר ההתנגשות כאשר ההתנגשות היא:
   א. פלסטית. ב. אלסטית.
9. משאית כבדה ומכונית קלה מתנגשות חזיתית.
   א. על מי מבין שתיהן יפעל כוח חבטה גדול יותר?
   ב. על מי מבין שתיהן יפעל מתקף גדול יותר?
   ג. האם לשני כלי הרכב יחול אותו השינוי בתנע?
   ד. התאוצה של איזה רכב תהיה גדולה יותר?
10. כדור נע במהירות v לעבר כדור שני זהה הנמצא במנוחה.
   א. מה תהיה מהירות הכדורים לאחר ההתנגשות-
   1) אם ההתנגשות היא אלסטית? 2) אם ההתנגשות היא פלסטית?
   ב. מהי המהירות היחסית בין הכדורים לאחר ההתנגשות בכל
   1) אם ההתנגשות היא אלסטית? 2) אם ההתנגשות היא פלסטית?



שאלות חישוב



1. כדור, שמסתו 150 גרם, נע במהירות של 24m/sec לעבר המחבט. מחבט חובט בכדור ומקנה לו מהירות של 36m/sec בכיוון ההפוך.

א. מהו השינוי בתנע של הכדור?

ב. מהו המתקף שהופעל על ידי החבטה?

ג. אם הכדור נגע במחבט במשך 0.002 שניות, מהי עצמת הכוח הממוצע בו נחבט הכדור?



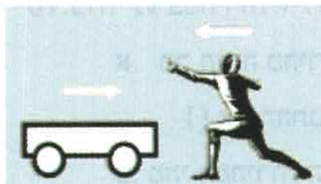
2. קליע, שמסתו, 10gr, נורה במהירות של 800m/sec מרובה, שמסתו 3kg.

מהי מהירות הרתיעה של הרובה?

3. קרונית, שמסתה m=80kg , נעה ימינה על מסילה אופקית חלקה במהירות v_1=4m/sec.

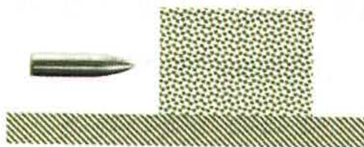


א. מהי מהירות הקרונית (גודל וכיוון) לאחר שאדם, שמסתו M = 80 kg, רץ בכיוון הקרונית במהירות v = 8m/sec משיג אותה, קופץ עליה ומתיישב בה?



ב. מה תהיה התשובה לסעיף א', אם אותו אדם ירוץ לקראת הקרונית?

4. קליע, שמסתו 10 gr, נורה אופקית במהירות של 500 m/sec לעבר בול עץ, שמסתו 5kg, הנמצא במנוחה.

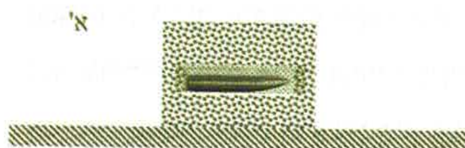


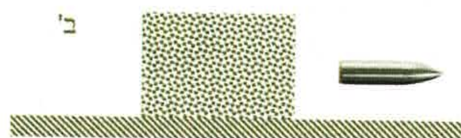
ייתכנו שני מצבים:

(א') הקליע נתקע בבול העץ.

(ב') הקליע יוצא מצידו השני במהירות 200 m/sec.

לגבי כל אחד מהמצבים א' ו- ב' חשבו, מהי מהירות בול העץ לאחר פגיעת הקליע?

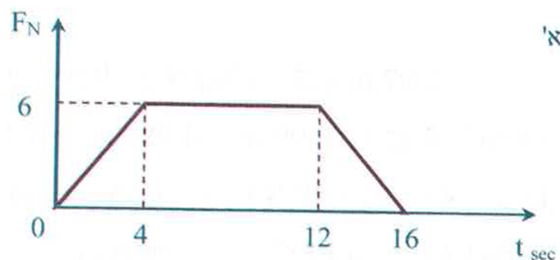


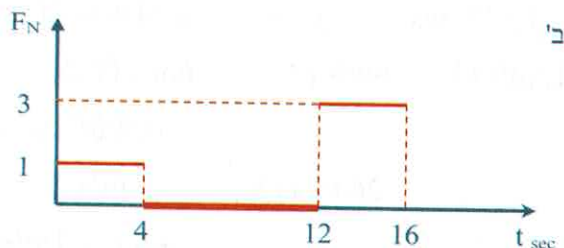


5. שני הגרפים א' ו- ב' מתארים את התלות בזמן של גודל הכוח, הפועל על גוף, הנמצא על משטח אופקי חלק. ברגע תחילת הפעלת הכוח מהירות הגוף היא 4m/sec. מסת הגוף היא 2kg. לגבי כל אחד מהגרפים ענו על השאלות הבאות:

א. מהו המתקף של הכוח, שהופעל בכל אחד משלושת פרקי זמן, אותם ניתן לזהות בגרף שינוי של הכוח?

ב. מהי המהירות הגוף בסוף כל אחד מפרקי זמן אלה?



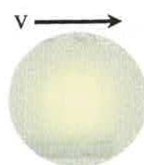


6. כדור, שמסתו 1.2kg, נופל ופוגע ברצפה במהירות של 15m/sec, וניתר ממנה במהירות של 10m/sec.

א. מהו השינוי בתנע של הכדור?

ב. מהו גודל הכוח הממוצע שפעל על הכדור, אם משך המגע בין הכדור לבין הרצפה היה 0.02 שניות?

7. כדור, שמסתו 4kg, נע במהירות 5 m/sec ימינה ומתפוצץ לשני חלקים. מהי מהירות החלק השני אחרי הפיצוץ, אם נתון שמסת החלק הראשון היא 3kg, ומהירותו אחרי הפיצוץ היא:





לפני הפיצוץ

אחרי הפיצוץ

(1) אפס; (2) 4 m/sec ימינה; (3) 2 m/sec שמאלה.

8. מסה של 4 kg נעה על משטח חלק במהירות של 3 m/sec ופוגעת במסה שנייה של 2 kg, הנמצאת במנוחה. מהי מהירות כל אחת מהמסות אחרי ההתנגשות, אם ההתנגשות היא:

א. פלסטית? ב. אלסטית?

תשובות

1. א. 9 kg·m/s ב. 9 N·s ג. 4500 N **2.** -2.67 m/s

3. 6 m/s ב. -2 m/s **4.** מצב 1: 0.99 m/s מצב 2: 0.6 m/s

5. עבור ציור א' : א. 1) j_1=12 N·s , j_2=48 N·s , j_3=12 N·s

ב. 1) 10m/s 2) 34m/s 3) 40m/s

עבור ציור ב' : א. 1) j_1=4 N·s , j_2=0 , j_3=12 N·s

ב. 1) 6m/s 2) 6m/s 3) 18m/s

6. א. -30 kg·m/s ב. -1500N

7. 1) 20 m/s 2) 8 m/s 3) 26 m/s

8. א. 2m/s ב. 1m/s , 4m/s

בין הכוחות הפועלים במגע ציינו את **הכוח האלסטי**. כוח זה פועל לעתים קרובות בשילוב עם כוחות אחרים, הגורמים להתנגשותם של גופים, לעיוותם או להיצמדותם. הכוחות האלסטיים פועלים במגמה להחזיר את הגופים למצבם המקורי. מסיבה זו לפעמים מוסיפים לשמו של הכוח את המילה "מחזיר", ומכנים אותו **כוח אלסטי מחזיר**.

הכוח האלסטי הוא תוצאה של כוחות פנימיים בתוך הגוף, כוחות עליהם נרחיב בהמשך. כמו מרבית התכונות, תכונת האלסטיות תקפה רק בתחום מאמצים מוגבל. כאשר מופעל על הגוף כוח גדול דיו, תכונת האלסטיות אינה מתקיימת, תחילה באופן חלקי ואחרי כן בכלל. הגוף קורס או נוזל. במצב זה התנהגות הגוף מתוארת על ידי התכונה ההפוכה – **פלסטיות**. בתחום הפלסטיות הגוף הנותר אינו מתנגד לכוח המופעל עליו, ועקב כוח זה הוא משנה את צורתו. כך, גופים העשויים מפלסטלינה הם גופים פלסטיים בטמפרטורת החדר. כוח קטן משנה בקלות את צורת גוש הפלסטלינה. אולם בטמפרטורות נמוכות מאוד הפלסטלינה הופכת להיות אלסטית ויכולה להישבר לחתיכות.

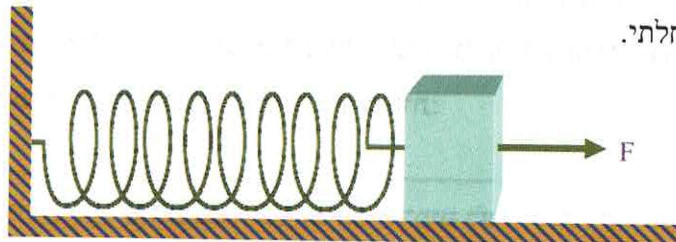
נדון בעזרת הדגמות מתאימות בשלושה מצבים עיקריים, בהם אנו פוגשים בפעולת כוחות אלסטיים.

I. כוח אלסטי של קפיץ

המקרה הראשון בו נדון הוא כוח **התגובה האלסטית** של קפיץ. זהו תיל עשוי פלדה, שתוך כדי יצירתו ניתנה לו צורה של סליל. מתברר, שצורה זו של סליל יחד עם תכונות הפלדה מספקות לקפיץ תכונה של אלסטיות גבוהה מאוד.

הדגמה מס' 1

קפיץ מחובר לקיר בקצהו האחד ובקצהו השני הוא מחובר לגוף המונח על משטח אופקי חלק (עין איור). כאשר נמשוך את הגוף ימינה, הקפיץ יתארך, וכשנרפה, יחזור הקפיץ לאורכו ההתחלתי.

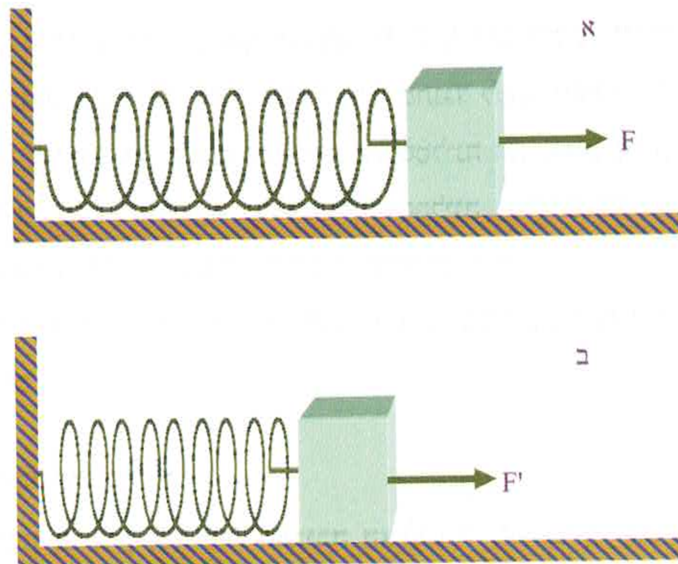


כלומר: קפיץ מפגין אלסטיות

הדגמה מס' 2

נראה עתה כיצד תכונה זו של הקפיץ מאפשרת את בנייתו של המכשיר למדידת כוח: **מד- כוח.** נבצע זאת בשני שלבים.

בשלב הראשון ניקח שני קפיצים **זהים** ונחבר אליהם גופים זהים. ננסה למצוא, אם יש קשר בין התארכות הקפיץ לכוח שפועל עליו (עין באיור). כאשר נפעיל על כל אחד מהגופים כוח ימינה, יתארכו הקפיצים, והכוחות האלסטיים יפעלו בכיוון הנגדי במגמה להחזיר את הקפיצים למצבם הרפוי. כלומר, בכל פעם שאנו מותחים את הקפיץ, אנו גורמים להיווצרות כוח אלסטי בקפיץ.



במצב בו הגוף מוזז ימינה ומוחזק במנוחה, הכוח האלסטי, שהקפיץ מפעיל על הגוף, זהה לכוח המושך ימינה. זאת מתוקף החוק הראשון של הכוחות שהגדרנו: הפירוש לכך שגוף אינו משנה את תנועתו הוא, שהכוחות הפועלים עליו מאזנים זה את זה.

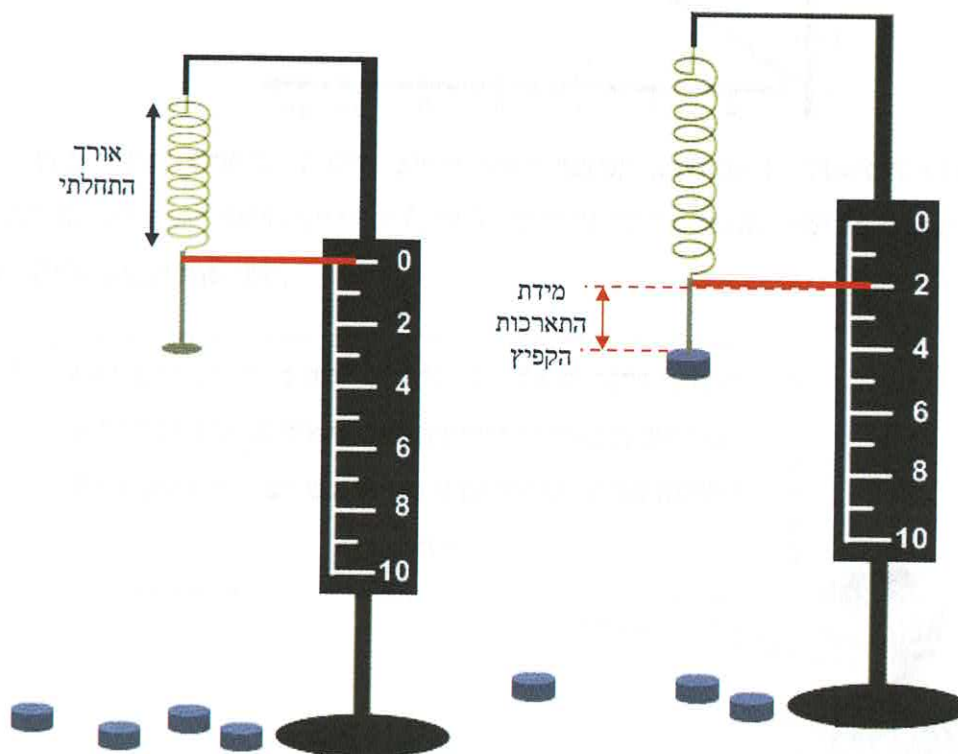
אם במצב **א'**, הכוח שפעל על הגוף גרם להתארכות גדולה יותר של הקפיץ מאשר במצב **ב'** (הקפיצים זהים), כלומר, **מידת התארכות הקפיץ מעידה על גודל הכוח הגורם לעיוות הקפיץ**, נוכל להגדיר **שוויון בין כוחות:**

שני כוחות יהיו שווים בגודלם, אם הם גורמים לעיוות זהה של הקפיץ.

בשלב השני ננסה למדוד במדויק את **גודלו** של הכוח שפועל. לשם כך יש למצוא את אופי הקשר בין **גודל הכוח שמפעיל הקפיץ** לבין **מידת התארכותו**. רק על סמך כך נוכל ליצור מכשיר למדידת כוחות.

נתלה קפיץ על כן ונמדוד את אורכו ההתחלתי של הקפיץ ללא עומס (מצב א'). עתה נתלה משקולת על הקפיץ (מצב ב'). במצב של איזון ללא תנועה נמדוד את התארכות הקפיץ.

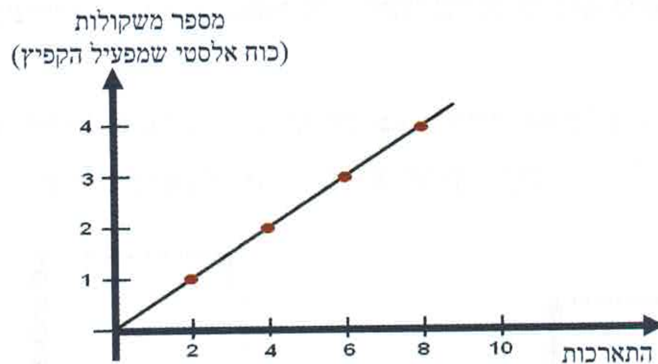
על המשקולת פועלים שני כוחות: **כוח הכובד**, הפועל כלפי מטה, ו**הכוח האלסטי**, שמפעיל הקפיץ כלפי מעלה. האיזון מחייב שוויון כוחות.



מסקנה:

הכוח שמפעיל הקפיץ שווה בגודלו לכוח הכובד הפועל על המשקולת.

כעת נתלה משקולת נוספת על הקפיץ. התלייה מכפילה את גודלו של כוח הכובד, הפועל כלפי מטה. נמדוד שוב את התארכותו של הקפיץ. נמשיך ונתלה שלוש ואחרי כן ארבע משקולות. כל פעם נרשום את התארכות הקפיץ. נסרטט עתה גרף, שיבטא את התלות בין גודל הכוח המופעל על הקפיץ לבין מידת התארכותו.



מהגרף ניתן לראות, שכאשר מוכפל הכוח המושך את הקפיץ, התארכות הקפיץ מוכפלת. כאשר גדל הכוח המושך פי 3, גדלה גם ההתארכות בהתאם. אופי תלות מסוג זה בין גדלים מכונה **יחס ישר**.

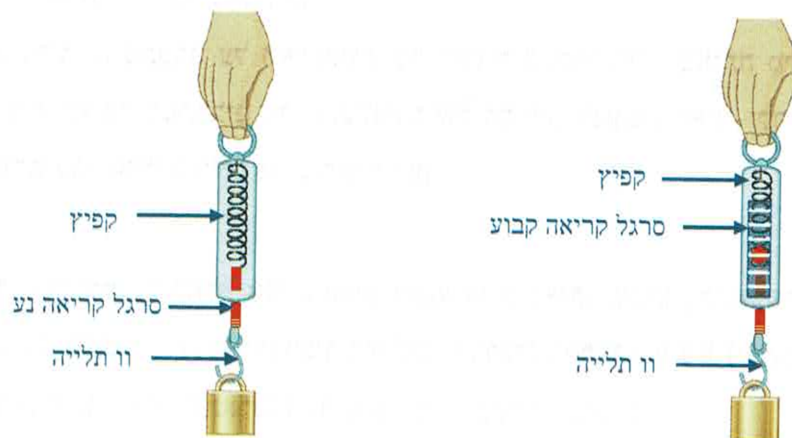
אומרים ששני גדלים מצויים ביחס ישר, כאשר הגרף המתאר את הקשר ביניהם הוא קו ישר העובר דרך ראשית הצירים. המנה (החלוקה) של שני ערכים מתאימים של אותם הגדלים היא קבועה.



תכונה זו של הקפיץ, היחס הישר בין התארכות הקפיץ לכוח הפועל עליו(ולכן גם לכוח האלסטי), מאפשרת לבנות מד כוח המכויל באופן קל ונוח.

מבנה מד כוח

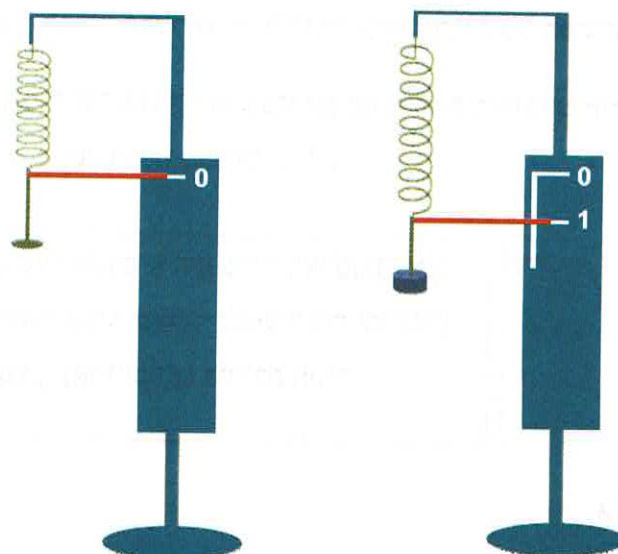
קיימים סוגים שונים של מדי כוח למדידת כוחות שונים. מד כוח פשוט מכיל בתוכו קפיץ, סרגל קריאה , ווו לתליית משקולות, המחובר לקפיץ.



שני סוגי מד-כוח: עם סרגל קבוע וסרגל נע

כיול מד כוח

פעולת כיול של מד כוח (או בלועזית: דינמומטר) היא פשוטה. מסמנים את מיקום קצה הקפיץ (המחוג האופקי) ללא משא ב- **"0"**



עתה נתלה משקולת של 100 גרם. המשקולת תימשך מטה בכוח של "1 ניוטון" (לפי הגדרת הניוטון שהצגנו). נסמן את המיקום החדש של המחוג **"1 ניוטון"**. הודות ליחס הישר בין התארכות הקפיץ לבין גודל הכוח המושך אותו ניתן ליצור סקאלה אחידה לפי התארכות המתאימה לכוח של ניוטון אחד.

מד כוח מסוג זה מתבסס על האלסטיות של הקפיץ בהתארכות. באותה מידה ניתן ליצור מד- כוח, כאשר מסתמכים על התכווצותו של הקפיץ. למעשה מאזני- קפיץ עבור שקילת הדברים בכל חנות מהווים מד כוח מסוג זה.

חוק הוק

כמו בהקשר לכל חוק פיזיקאלי, אנו שואפים לבטא אותו באופן מתמטי, המאפשר תיאור כמותי מדויק של התופעה. נסמן את הכוח האלסטי שמפעיל הקפיץ באות F (Force) ואת התארכות הקפיץ ב- ΔL. התארכות זו היא שינוי באורך הקפיץ בהשוואה למצב בו לא פעל עליו כוח חיצוני: $\Delta L = L - L_0$, כאשר L – אורך הקפיץ כאשר הופעל כוח ו- L_0 אורך הקפיץ ללא הפעלת הכוח. הביטוי הנדרש הוא:

$$F = k \cdot \Delta L$$


רוברט הוק
1635 – 1703

כאן k הוא מקדם האלסטיות – הקבוע של היחס הישר. אם נמדוד את הכוח F בניוטונים ואת אורך הקפיץ במטרים, נוכל לקבל את היחידות של המקדם k : $\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$.

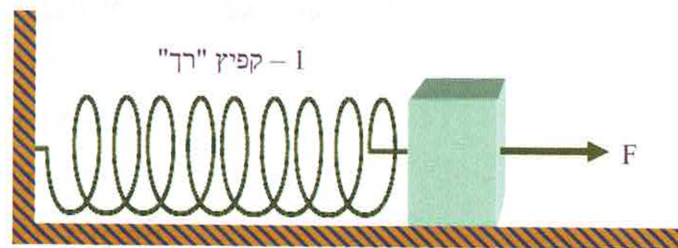
זהו חוק האלסטיות של הקפיץ. הראשון שניסח אותו היה **רוברט הוק**, גם הוא פיזיקאי דגול מאנגליה, בן זמנו של ניוטון מהמאה ה- 17.

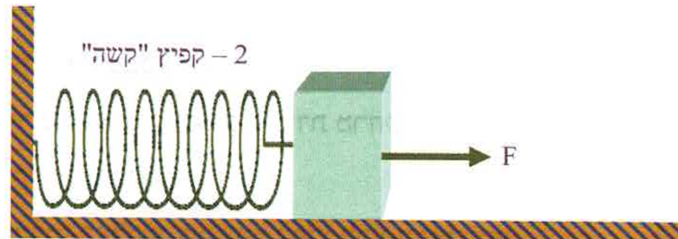


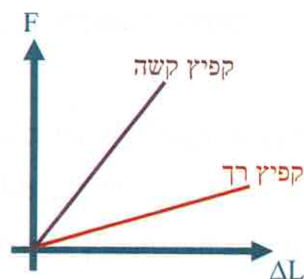
המשמעות של המקדם k היא מידת האלסטיות של הקפיץ, כלומר: הכוח שצריך להפעיל כדי שהקפיץ יתארך (או יתכווץ) ביחידת אורך.

קפיצים שונים נקבל ערכים שונים של מקדם האלסטיות k. נמחיש זאת:

ניקח שני קפיצים "רך" (1) ו"קשה" (2).







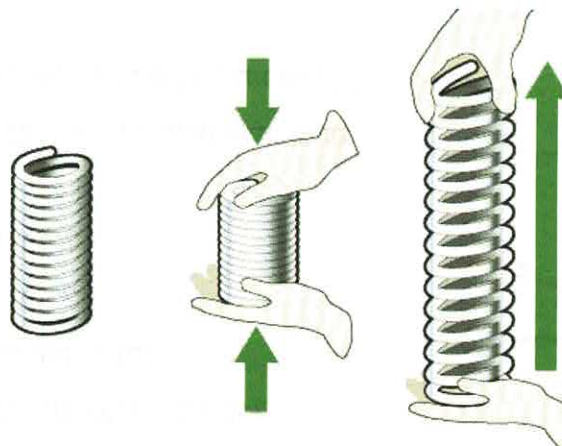
אנו מכנים קפיץ "רך", אם הקפיץ מתארך משמעותית על ידי כוח קטן יחסית. כלומר אותו כוח F יגרום לשני הקפיצים התארכות שונה כך ש:

$$(\Delta L)_1 > (\Delta L)_2$$

לכן, לפי חוק האלסטיות, $F = k \cdot \Delta L$, נקבל:

$$k_1 < k_2$$

כלומר, בין שני קפיצים בעלי אלסטיות שונה קפיץ **רך** יותר הוא בעל מקדם k **קטן יותר**. משום שהנחנו שהכוח שהפעלנו היה שווה נקבל: $k_1 \cdot (\Delta L)_1 = k_2 \cdot (\Delta L)_2$



שלושה מצבים בהם קפיץ עשוי להיות: רפוי, מכווץ או מוארך.



שאלות הבנה וחשיבה - לדיון בכיתה

1) הכוח האלסטי שמפעיל קפיץ נמצא ביחס ישר ל:

א. אורכו של הקפיץ.

ב. התארכותו של הקפיץ.

ג. כיווצו של הקפיץ.

ד. תשובות ב' ו- ג' נכונות.

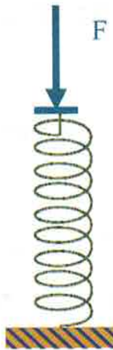
2) קבוע הכוח של קפיץ מבטא את:

א. הכוח הנדרש להארכת הקפיץ ביחידת מרחק.

ב. מידת הנוקשות של הקפיץ.

ג. היחס בין הכוח האלסטי שמפעיל קפיץ לבין התארכותו.

ד. כל התשובות נכונות.



3) קפיץ מחובר לרצפה, ומפעילים עליו כוח כלפי מטה, המכווץ את הקפיץ.

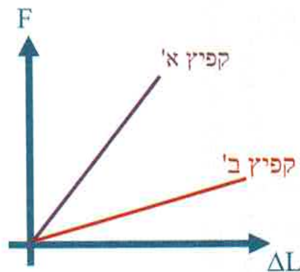
האם נכון ש:

א. הקפיץ יפעיל כוח כלפי מטה?

ב. הקפיץ לא יפעיל כוח?

ג. הקפיץ יפעיל כוח כלפי מעלה?

ד. לא ניתן לדעת אם הקפיץ יפעיל כוח כלשהו?



4) הגרף הבא מתאר את הקשר בין הכוח האלסטי, שמפעילים שני קפיצים, לבין מידת התארכותם.

האם נכון ש:

א. קפיץ א' חזק יותר?

ב. קפיץ ב' חזק יותר?

ג. לשני הקפיצים אותו חוזק?

ד. לא ניתן לדעת איזה קפיץ חזק יותר?

5) הגרף הבא מתאר את התארכותם של שני קפיצים בתלות בכוח, שמופעל עליהם.

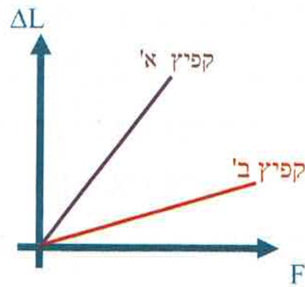
האם נכון ש:

א. קפיץ א' חזק יותר?

ב. קפיץ ב' חזק יותר?

ג. לשני הקפיצים אותו חוזק?

ד. לא ניתן לדעת איזה קפיץ חזק יותר?



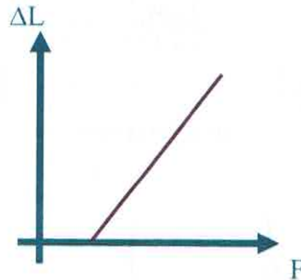
6) הגרף הבא מתאר את התארכותו של קפיץ מסוים בתלות בכוח שמופעל עליו. האם נכון ש:

א. הקפיץ התארך עוד לפני שפעל עליו כוח?

ב. עבור כל כוח שפעל התקבלה התארכות מסוימת?

ג. החל מערך מסוים של כוח שפעל ניתן היה למדוד את התארכות הקפיץ?

ד. כל התשובות אינן נכונות?



7) גוף א', המונח על משטח חלק ומחובר לקפיץ אופקי, נמשך ימינה על ידי כוח F. כאשר נחליף אותו בגוף ב' ונפעיל כוח זהה, מידת התארכות הקפיץ:

א. תגדל.

ב. תקטן.

ג. לא תשתנה.

ד. תהיה תלויה בכוח הכובד הפועל על הגוף.

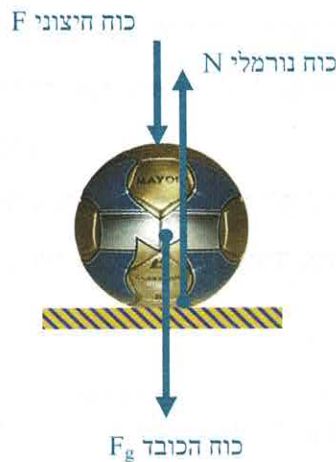






אם נדרוך על הכדור בכוח חיצוני אנכי F, נגרום לו עיוות נוסף. ההסבר הפיזיקלי לכך הוא, שעם הפעלת הכוח F על הכדור, הכוח הנורמלי N צריך עתה לאזן גם את הכוח החיצוני וגם את כוח הכובד F_g , הפועל על הכדור. הכוח הנורמלי יגדל, ויגדל העיוות של הכדור. הכוח N יהיה **גדול יותר** ושווה לסכום של כוח הכובד והכוח החיצוני, הפועלים על הכדור (עין באיור):

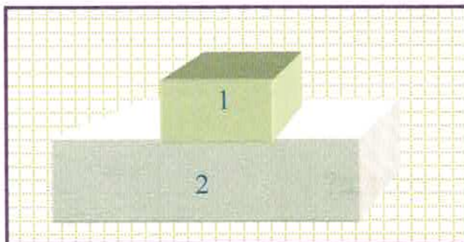
$$F + F_g = N$$



באופן כללי נכון לטעון, ש**הכוח הנורמלי אינו קבוע**, אלא יכול לקבל ערכים שונים בהתאם לכוחות האחרים, הפועלים על הגוף. כאשר גוף מונח על מאזניים, הכוח הנורמלי שווה לתוצאת השקילה – משקל הגוף. כמו כל כוח אחר, הכוח הנורמלי נמדד ביחידות של ניוטון.

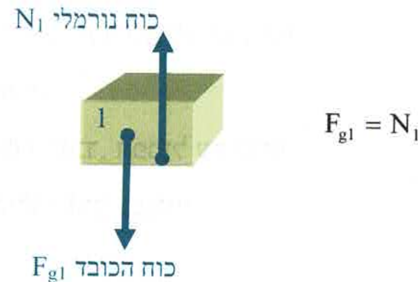
דוגמא לניתוח כוחות

שני בולי עץ מונחים זה על זה (תרשים).
ננתח את הכוחות הפועלים על כל אחד מהבולים.



ננתח את הכוחות הפועלים על הבול העליון (1 בתרשים):

על הגוף פועל **כוח הכובד** F_{g1} כלפי מטה. מאחר והגוף אינו זז, כוח זה מאוזן על ידי **הכוח הנורמלי** N_1, שבול מס' 2 מפעיל על הבול העליון. הואיל והבול לא זז, יהיו הכוחות הפועלים עליו מאוזנים:



$$F_{g1} = N_1$$

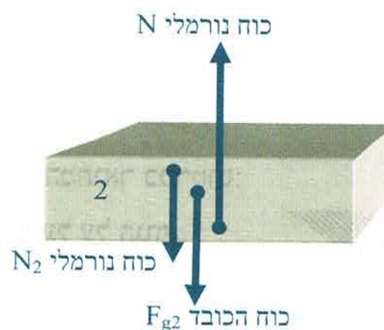
נעבור לגוף 2 (הגוף התחתון).

על הגוף פועל כוח הכובד F_{g2}. מצד הבול העליון (1) פועל על הבול התחתון הכוח הנורמלי N_2, זאת משום שהבול התחתון מפעיל על העליון כוח נורמלי N_1, ולפי חוקי הכוח ההשפעה בין גופים היא הדדית ושווה, לכן:

$$N_1 = N_2$$

גוף 2 מונח על המשטח ומעיק עליו. כתוצאה מכך פועל על הגוף כוח נורמלי N מצד המשטח כלפי מעלה. מאחר שגם בול 2 אינו זז, הכוחות עליו מתאזנים (לפי חוקי כוח). כלומר, שני הכוחות, הפועלים כלפי מטה (N_2 ו-F_{g2}), משתווים יחד לכוח הנורמלי N, הפועל כלפי מעלה:

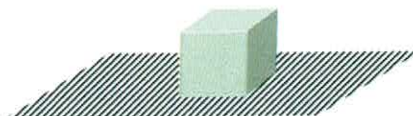
$$F_{g2} + N_2 = N$$





שאלות הבנה וחשיבה- לדיון בכיתה

1) כוח התגובה האלסטית במקרה המתואר בסרטוט:



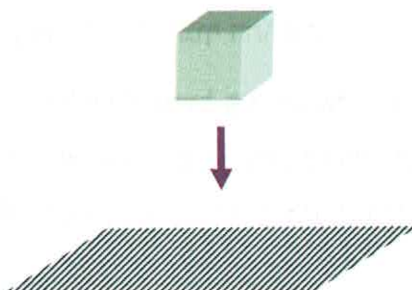
א. שווה לכוח הכובד הפועל על הגוף.

ב. שווה לאפס.

ג. קטן מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

2) כוח התגובה האלסטית במקרה המתואר בסרטוט:



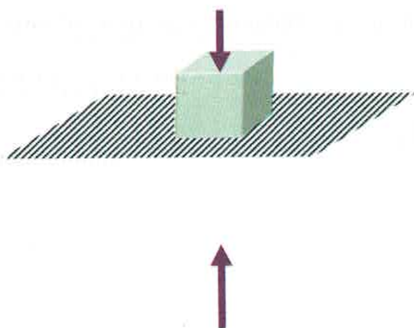
א. שווה לכוח הכובד הפועל על הגוף.

ב. שווה לאפס.

ג. גדול מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

3) התגובה האלסטית במקרה המתואר בסרטוט:



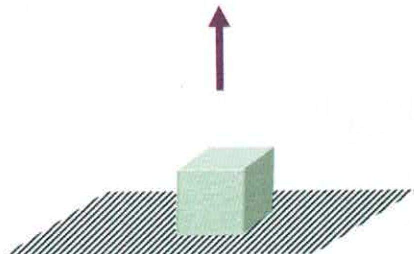
א. שווה לכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ב. שווה לאפס.

ג. שווה לכוח F, הדוחף את הגוף כלפי מטה.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

4) התגובה האלסטית במקרה המתואר בסרטוט:

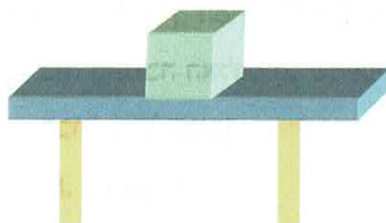


א. שווה לכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ב. שווה לאפס.

ג. שווה לסכום של כוח הכובד והכוח המושך את הגוף כלפי מעלה.

ד. כל התשובות אינן נכונות.



5) על שולחן, העומד על הרצפה, מונח בול עץ.

הכוחות הפועלים על השולחן הם:

א. כוח הכובד.

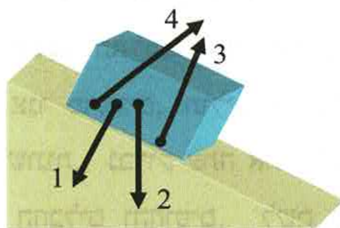
ב. כוח הכובד ותגובה אלסטית של הרצפה.

ג. כוח הכובד, תגובה אלסטית של הרצפה ותגובה אלסטית מצד בול העץ.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

6) נתון בול עץ, המונח על משטח משופע. כוח התגובה האלסטית, שמפעיל המשטח על הבול

פועל בכיוון:



א. חץ מס' 1.

ב. חץ מס' 2.

ג. חץ מס' 3.

ד. חץ מס' 4.

7) כוח התגובה האלסטית הפועל על הגוף:

א. אינו חייב להיות שווה לכוח הכובד.

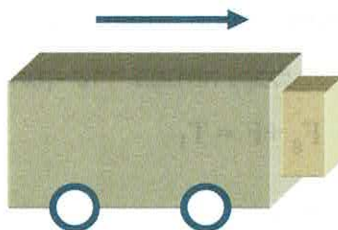
ב. יכול לקבל ערכים שונים.

ג. פועל בניצב למשטחי הגופים הנמצאים במגע.

ד. כל התשובות נכונות.

8) קרונית מגבירה את תנועתה בכיוון ימין, כשבול עץ צמוד לדופן הקדמי שלה.

כוח התגובה האלסטית על הבול:



א. פועל כלפי מעלה.

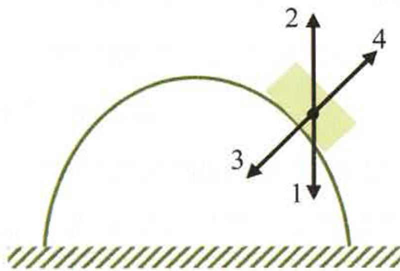
ב. פועל כלפי מטה.

ג. פועל בכיוון ימין.

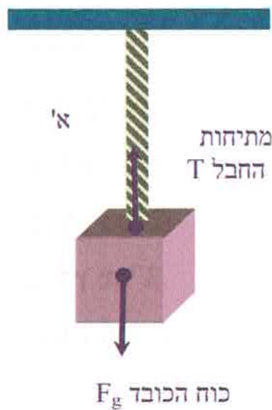
ד. לא קיים במקרה זה כוח תגובה אלסטית.

9) נתון בול עץ, המונח על משטח חצי כדורי.
כוח התגובה האלסטית, שמפעיל המשטח על הבול פועל בכיוון:

א. חץ מס' 1.
ב. חץ מס' 2.
ג. חץ מס' 3.
ד. חץ מס' 4.



II. מתיחות אלסטית בחוט או חבל



חוטים או חבלים מספקים לנו מקרה שלישי, בו באה לידי ביטוי **התגובה האלסטית** של החומר. באמצעות חוטים או חבלים אנו מושכים, תולים ומחברים בין גופים לצורך מטרות שונות. נבדוק עתה את המשמעות הפיזיקאלית של פעילות החבלים והחוטים. לשם כך נבצע ניתוח כוחות במערכת פשוטה: גוף תלוי בעזרת חבל לתקרה (איור א').

נציין את הכוחות הפועלים על הגוף: כוח הכובד F_g פועל כלפי מטה, ומאחר והגוף נמצא במנוחה, כוח זה מאוזן על ידי כוח, הפועל כלפי מעלה. זהו כוח מתיחות החבל T, המונע את נפילת הגוף. הסימון באות T הוא בגלל השם הלועזי למתיחות: Tension. מקורו של כוח זה הוא באלסטיות של החבל. היות והגוף אינו זז, נוכל לטעון לאיזון הכוחות:

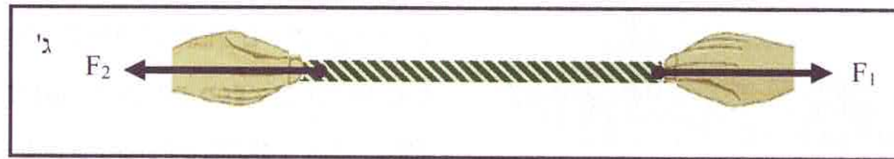
$$F_g = T$$



מתיחות החבל אינה קבועה אלא משתנה בהתאם לנסיבות. אם נמשוך את הגוף בכוח נוסף F כלפי מטה (איור ב'), מתיחות החבל תגדל, משום שעתה, בנוסף לכוח הכובד, מאזנת מתיחות החבל גם את הכוח F. היות והגוף שרוי במנוחה נקבל:

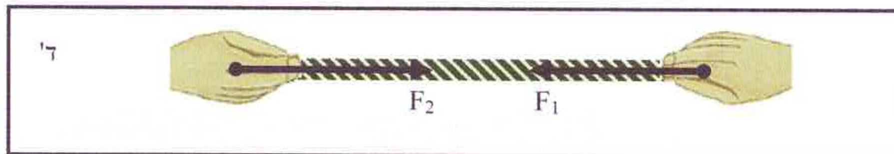
$$F_g + F = T_1$$

עתה ניקח חבל ונמתח אותו בשתי ידיים (איור ג').



איזה כוחות פועלים **על החבל**? כוח חיצוני F_1 מושך את החבל ימינה וכוח חיצוני F_2 –שמאלה. מאחר והחבל נמצא במנוחה, שני הכוחות באיזון. מסיקים שבמצב מנוחה הכוחות, הפועלים בשני קצותיו של חבל מתוח, **שווים בגודלם**.

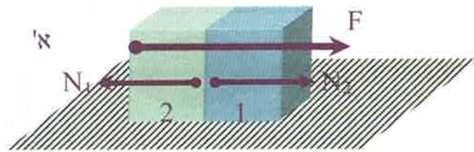
מההדדיות הפעילות בין כול הגופים נסיק גם, שחבל המתוח מפעיל על הידיים כוחות שווים בגודל ומנוגדים בכיוון, כוחות אלו מורגשים על ידינו (איור ד').



מאחר ששיקולי איזון הכוחות תקפים בכל נקודה לאורך החבל, נוכל להסיק באופן כללי, שבחבל, שנמצא במנוחה (או שאינו משנה את תנועתו) כוחות המתיחות אינם משתנים לאורך החבל.

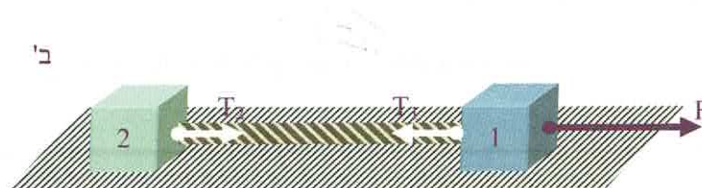
נקודות חשובות:

1. כאמור, עיוות הגופים הגורם לכוח האלסטי יכול להיות בלתי נראה לעין. כך זה קורה בהיווצרות כוח נורמלי במגע בין גופים מוצקים. חוט (או חבל) מתוח נעשה "קשה", אך התארכותו היא מזערית.
2. בפועל, על חוטים וחבלים פועל כוח הכובד הודות למסה העצמית. כוח זה משנה את המסקנות על זהות הכוחות האלסטיים בקצוות החבל. אולם, ניתן להזניח תופעה זאת, כאשר כבידת החבל קטנה בהרבה מהכוחות, הפועלים עליו מצד הגופים הקשורים.
3. חוט (או חבל) מתוח יכול **למשוך** גופים, אך **לא לדחוף** אותם. בכך שונה חבל מן הקפיץ (או הבול) בו מתפתח כוח אלסטי גם בהתכווצות.

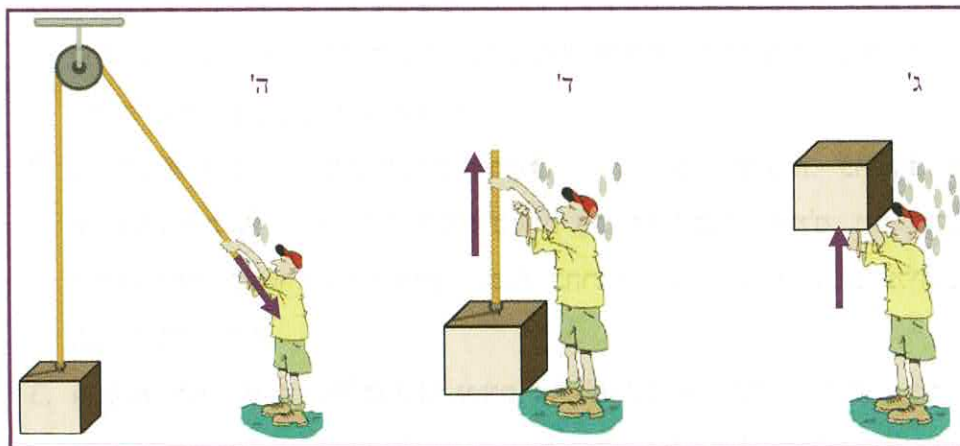


נסתכל בשני בולי עץ, שכוח F מצמיד אותם (איור א'). במצב זה הבולים דוחפים זה את זה. כתוצאה מכך, הם מפעילים כוחות מגע שווים בגודל והפוכים בכיוונם: שני כוחות נורמליים: N_1 ו-N_2.

עתה נחבר את שני הבולים ביניהם בעזרת חבל ונמשוך ימינה אחד מן הבולים (איור ב'). החבל מפעיל על בול מס' 1 כוח מתיחות T_1 ועל בול מס' 2 – כוח מתיחות T_2. מאחר ומתיחויות אלה זהות, המצב כולו הופך להיות זהה למצב הקודם (איור א') מבחינת הכוחות הפועלים על הגופים 1 ו- 2. ניתן להגיד, אם כן, שהחבל שימש **אמצעי להעברת כוח בין הגופים**.



שימוש נוסף וחשוב בחבלים הוא **שינוי כיוון ההפעלה של כוח** על גופים. הדבר נעשה באמצעות גלגלת*, המשנה את כיוון הפעלת הכוח. לדוגמא, ניתן להחזיק גוף מעל לקרקע בדרכים שונות, המתוארות באיורים ג', ד', ו- ה'. מבין מצבים אלה מצב ה' הוא הנוח ביותר. זאת משום שהגלגלת אפשרה הפעלת כוח כלפי מטה (איור ה') במקום כלפי מעלה (איורים ג' ו-ד'). כידוע, להפעיל כוח כלפי מטה נוח יותר.

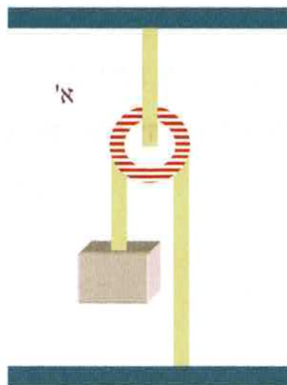


במצב ג', כלל ללא החבל, על האדם לתמוך בגוף **בדחיפה** כלפי מעלה בכוח השווה בגודלו לכוח הכובד הפועל על הגוף. לשם כך יש למצוא מקום אחיזת נוח, הדבר אינו קל כלל!

במצב ד' האדם **מושך** את הגוף כלפי מעלה בעזרת החבל באותו גודל כוח. גם מצב זה של משיכה אינו נוח. סבלים מקצועיים נמנעים מלהרים כך גופים.

במצב ה', האדם מושך את החבל בעזרת הגלגלת. במצב זה הכוח מופעל כלפי מטה. הניסיון מעיד שזאת הדרך הנוחה ביותר לאדם (וגם בטיחותית יותר).

* על הגלגלת נדון בהרחבה, בפרק מכונות פשוטות.



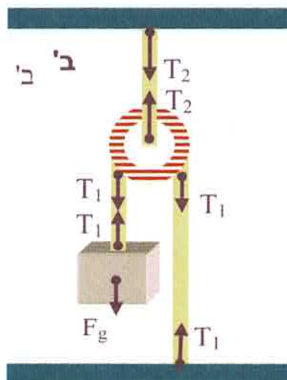
דוגמת ניתוח כוחות

גוף מוחזק במנוחה בעזרת חוט, העובר דרך גלגלת, הקשורה לתקרה (איור א').

א. מהי המתיחות בחוט המושך את הבול?

ב. באיזה כוח מושך החוט את הרצפה?

ג. באיזה כוח מושך החוט העליון את התקרה?



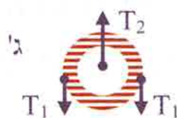
תחילה נסמן את כל כוחות הפועלים על הגוף ועל החבלים (איור ב').

נציין שעקב מצב המנוחה של הגוף, הכוחות הפועלים עליו מאזנים זה את זה. כך מגיעים למסקנה, שבחבל המושך את הגוף כלפי מעלה המתיחות היא $\mathbf{T_1 = F_g}$.

כאמור, המתיחות בתוך החבל עוברת ללא שינוי. כך מסיקים, שהחבל מושך את הרצפה באותו הכוח שהוא מושך את הגוף: T_1.

למציאת הכוח, בו מושך החבל את התקרה, ננתח תחילה את הכוחות הפועלים על הגלגלת (איור ג').

הכוחות הם : שני כוחות T_1 – הפועלים על הגלגלת כלפי מטה מצד החבל, הנשען על הגלגלת (אלה הם כוחות המתיחות בחבל). בנוסף פועל על הגלגלת כוח המתיחות T_2 של החבל, הקושר בין התקרה ובין הגלגלת. היות והגלגלת נמצאת במנוחה, הכוחות עליה מאוזנים. כלומר:

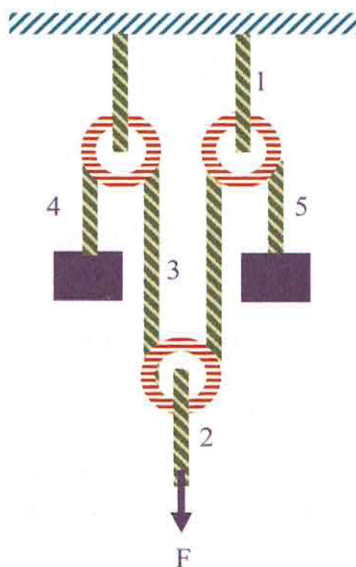


$$T_2 = 2T_1.$$

המתיחות בחבל הקשור לתקרה **כפולה** מהמתיחות בחבל הקשור לבול, כלומר, כפולה מכוח הכובד הפועל על הגוף: $T_2 = 2F_g$.

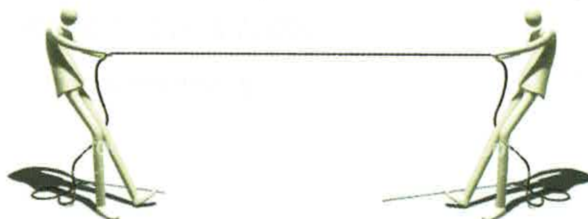
תרגיל כיתה

מתוארת מערכת בעלת מספר חוטים, הנמצאת במנוחה. מצאו את המתיחות בכל אחד מהחוטים ואת גודלו של הכוח F, אם ידוע שכוח הכובד הפועל על כל אחד מהגופים הוא 25 ניוטון ?





1) שני אנשים מושכים בחבל, כל אחד בכוח של 10 ניוטון. המתיחות בחבל שווה:



א. אפס.

ב. 10 ניוטון.

ג. 20 ניוטון.

ד. 15 ניוטון.

2) גוף תלוי על חוט. המתיחות במקרה זה:



א. שווה לאפס.

ב. שווה לכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ג. גדולה מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ד. קטנה מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

3) הכוח F, הנדרש להחזיק גוף מבלי לשנות את גובהו, שווה ל:



א. כוח הכובד, הפועל על הגוף.

ב. מחצית מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ג. כפליים מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ד. שליש מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

4) הכוח F הנדרש לשמור את המערכת הבאה במנוחה שווה ל:



א. כוח הכובד, הפועל על הגוף.

ב. מחצית מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ג. כפליים מכוח הכובד, הפועל על הגוף.

ד. שליש מכוח הכובד, הפועל על הגוף.



5) אדם מושך חבל הקשור, לעץ. המתיחות בחבל:

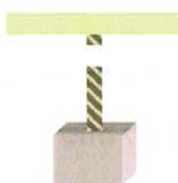
א. שווה לכוח שהאדם מפעיל.

ב. שווה לאפס.

ג. כפולה מהכוח, שהאדם מפעיל.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

6) גוף קשור לחוט, המחובר לתקרה. ברגע מסוים נקרע החוט בנקודת חיבורו לתקרה, והבול והחוט נופלים. מתיחות החוט בזמן הנפילה:



א. שווה לכוח הכובד הפועל על הגוף.

ב. שווה לאפס.

ג. לא ניתן לדעת את גודלה.

ד. גדלה בזמן נפילת הגוף.



7) שני בולי עץ זהים, הקשורים בעזרת חוט, מורמים כלפי מעלה ע"י כוח F מבלי לשנות את תנועתם. המתיחות בחוט:

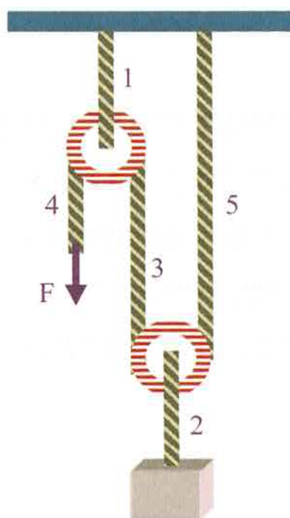
א. שווה לגודל הכוח F.

ב. שווה לכוח הכובד הפועל על שני הבולים.

ג. שווה לכוח הכובד הפועל על הבול התחתון.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

ה.



8) המערכת הבאה נמצאת במנוחה. האם נכון ש:

א. $T_1=T_2$?

ב. $T_3=T_4=T_5$?

ג. $T_2=2T_5$?

ד. כל התשובות נכונות?



כוח המתיחות האלסטית

1. רשמו שלושה שימושים שנעשים בחוטים ובחבלים (כאלה שלא הוזכרו בפרק).

2. מהו ההבדל בין כוח המתיחות, המופיע בחבל, לבין הכוח האלסטי, המופיע בקפיץ, בחינת אופן הפעולה (משיכה, דחיפה)?

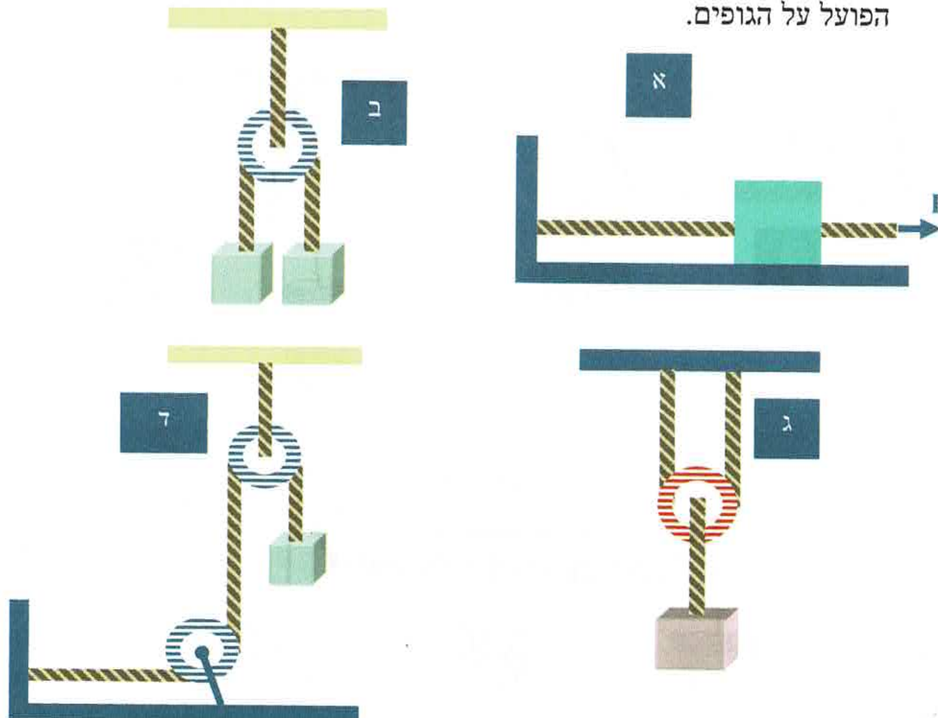
3. מהו ההבדל בין כוח המתיחות, המופיע בחבל, לבין כוח התגובה האלסטית, הפועל בין משטחים, מבחינת אופן הפעולה (משיכה, דחיפה)?

4. על אילו הנחות עלינו להתבסס, כאשר אנו טוענים, שהמתיחות לאורך החבל אינה משתנה?

5. בכל אחד מהסרטוטים א'- ד' שבעמוד הבא מתוארת מערכת בעלת כמה חוטים הנמצאת במנוחה.

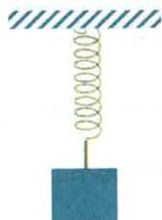
א. סמנו בעזרת חיצים את כיוון המשיכה שהחוטים מפעילים, בכל אחת מהמערכות.

ב. נתחו את הכוחות, הפועלים על כל אחד מהגופים, ואת הכוח בו, מושך החוט את התקרה או את הקיר, שאליו הוא מחובר. בטאו את המתיחות בעזרת כוח הכובד, הפועל על הגופים.



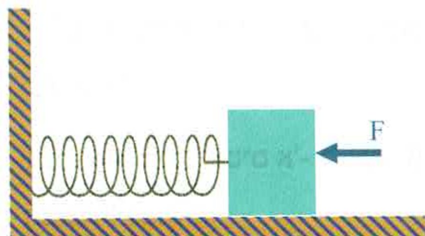


שאלות חישוב

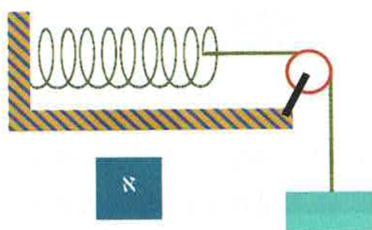


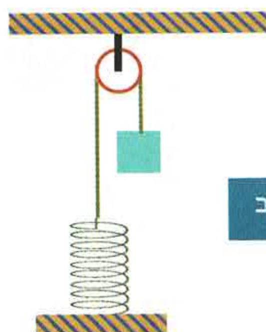
1. על מסה, הקשורה לקפיץ אנכי, פועל כוח כובד של 10 ניוטון . אם התארכות הקפיץ היא 0.4 מטר, מהו קבוע הכוח של הקפיץ ?

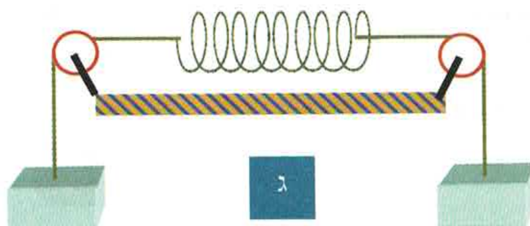
2. מהו גודלו של הכוח F, אם ידוע שהוא מכווץ את הקפיץ ב- 20 ס"מ וקבוע הכוח של הקפיץ הוא $20\ \frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$?



3. בכל המצבים הבאים קבוע הכוח של הקפיץ הוא $50\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$ וגודלו של כוח הכובד, הפועל על כל אחד מהגופים, הוא 50 ניוטון. מהי התארכות הקפיץ בכל אחד מהמצבים ?







4. כשתולים על קפיץ התלוי אנכית משקולת של 15 ניוטון, הקפיץ מתארך ב- 25 ס"מ.

א. מהו קבוע הכוח של הקפיץ ?

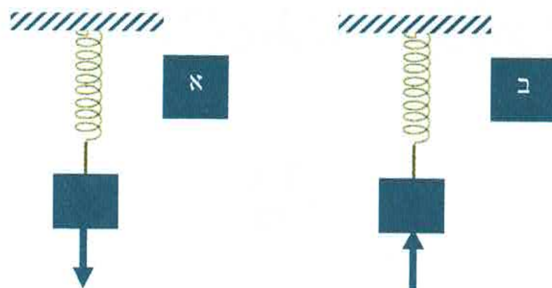
ב. מה תהיה התארכות הקפיץ כשיתלו משקולת של 60 ניוטון ?

ג. מהו גודל כוח הכובד הפועל, כשהתארכות הקפיץ היא 1.5 מטר ?

5. לקפיץ קבוע כוח של $30\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$. מה תהיה מידת התארכות או התכווצות הקפיץ, אם בנוסף לכוח הכובד של 40 ניוטון, הפועל על הגוף המחובר לקפיץ, מפעילים כוח של 20 ניוטון ?

א. כלפי מטה ?

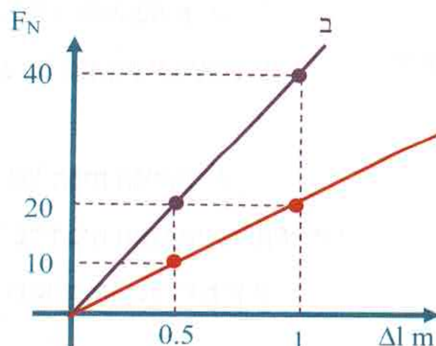
ב. כלפי מעלה ?



6. הגרף שלפניך מתאר את הכוח, שמפעילים שני קפיצים שונים בפונקציה של ההתארכות שלהם.

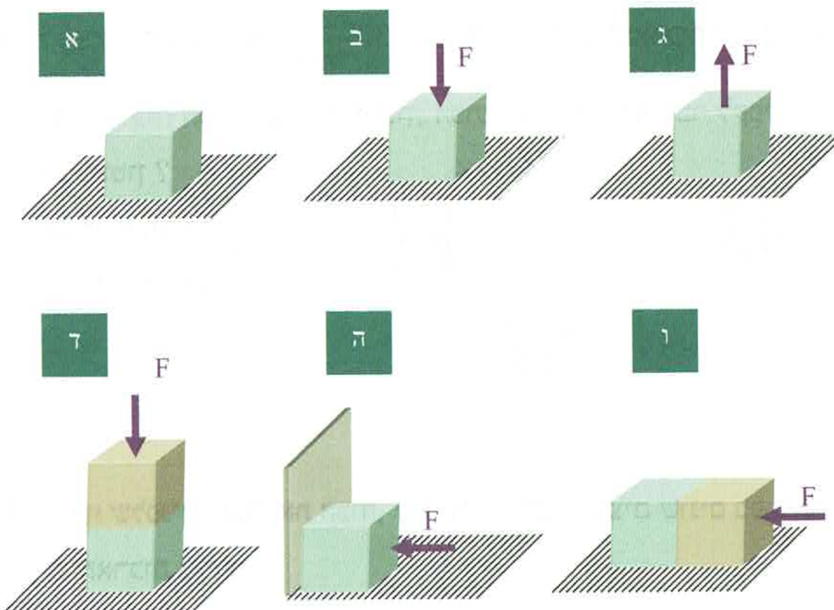
א. מצאו את קבוע הכוח של כל אחד מהקפיצים.

ב. מה תהיה מידת ההתארכות של כל אחד מהקפיצים, כשיתלו על כל אחד מהם משקולת של 25 ניוטון ?



7. א. העתיקו את התרשימים למחברותיכם והוסיפו לכל אחד מהשרטוטים חיצים, המתארים את כיווניהם של כל הכוחות הנורמליים, הפועלים על כל אחד מהגופים. (כל המשטחים חלקים).

ב. חשבו את גודלו של הכוח הנורמלי בכל אחד מהמצבים, אם ידוע שכוח הכובד הפועל על הגוף הוא 20 ניוטון וגודלו של הכוח F הוא גם כן 20 ניוטון.



8. כוח F שגודלו 50 ניוטון מושך גוף המחובר לקפיץ. קבוע הכוח של הקפיץ $100\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$ וכוח הכובד הפועל על הגוף הוא 40 ניוטון. הגוף נמצא במנוחה והמשטח חלק.

א. שרטטו את כל הכוחות הפועלים על הגוף.

ב. מהו גודלו של הכוח הנורמלי ?

ג. מהו גודלו של הכוח האלסטי של הקפיץ ?

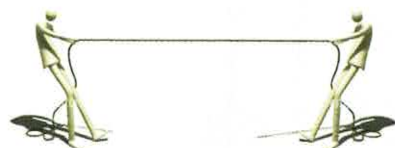
ד. מהי מידת התארכותו של הקפיץ ?



9. מהי המתיחות בחוט, אם ידוע, שכוח הכובד הפועל על הגוף שווה ל- 60 ניוטון ?



10. אדם מושך חבל הקשור לעץ בכוח של 80 ניוטון. מהו גודל המתיחות בחבל ?



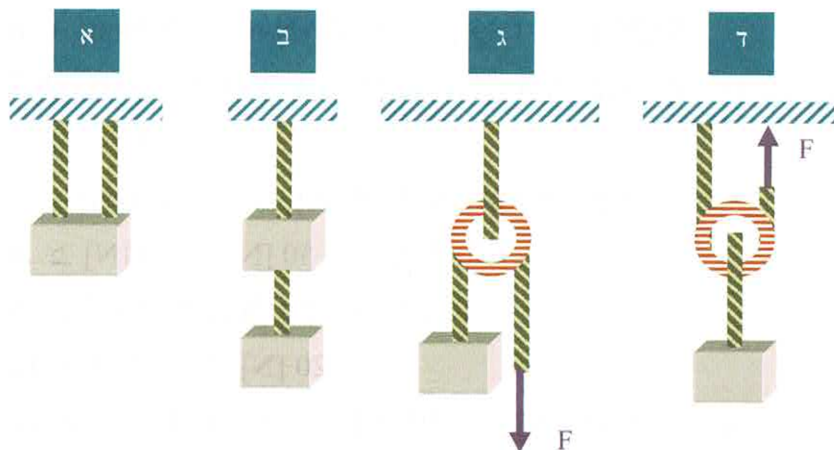
11. שני אנשים מושכים בחבל, כל אחד בכוח של 30 ניוטון. מהי המתיחות בחבל ?

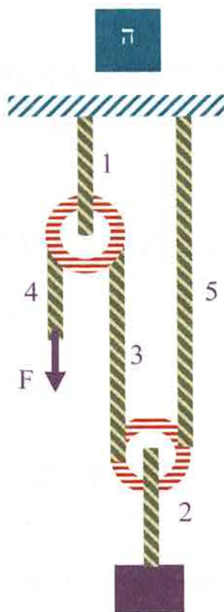
12. שני בולי עץ זהים, הקשורים בעזרת חוט, מורמים כלפי מעלה ע"י כוח F במהירות קבועה.

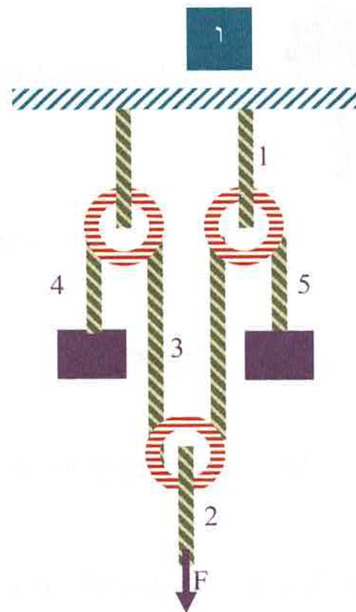
א. מה גודל המתיחות בחוט, המקשר בין הבולים, אם ידוע שעל כל אחד מהם פועל כוח כובד של 10 ניוטון ?

ב. מהו גודלו של הכוח F ?

13. בכל אחד מהשרטוטים מתוארת מערכת בעלת מספר חוטים, הנמצאת במנוחה. מצאו את המתיחות בכל אחד מהחוטים ואת גודלו של הכוח F, אם ידוע שכוח הכובד הפועל על כל אחד מהגופים הוא 60 ניוטון ?







תשובות

1. 25 [N/m]

2. 4 [N]

3. א. 1 [m] ב. 1 [m] ג. 1 [m]

4. א. 60 [N/m] ב. 1 [m] ג. 90 [N]

5. א. 2[m] ב. 0.66 [m]

6. א. 20[N/m] , 40 [N/m] ב. 1.25 [m] , 0.625 [m]

7. א. 20 [N] ב. 40 [N] ג. 0 ד. 60 [N] מהרצפה , 40 [N] בין הגופים

ה. 20 [N]

ו. 20 [N] מהרצפה, 10 [N] הגופים אחד על השני.

8. ב. 40 [N] ג. 50 [N] ד. 0.5 [m]

9. 60 [N] **10.** 80 [N] **11.** 30 [N]

12. א. 10 [N] ב. 20 [N]

13. א. 30 [N] ב. 60 [N] , 120 [N] ג. 60 [N] ד. 30 [N]

ה. 30 [N] ; 3,4,5: 30 [N] ; 1,2: 60 [N]

ו. 120 [N] ; 3,4,5: 60 [N] ; 1,2: 120 [N]

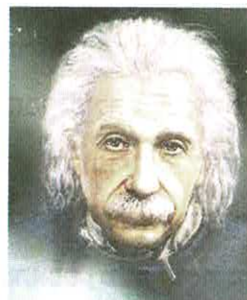
פרק ז' - משקל

מושג חשוב, הנמצא בשימוש רב בפיסיקה ובחיי היום- יום, הוא **משקל**, אם כי לעתים מקנים לו משמעות שונה. האמת היא שלמושג "משקל" היסטוריה של אלפי שנים. אנשים שקלו דברים עוד הרבה לפני שאריסטו ייסד את הפיזיקה, במאה הרביעית לפני הספירה. משקל החפץ אופיין תמיד בכובדו, כלומר, במידת הקושי להרים או להזיז אותו. המשקל נתפס גם כסיבה **לנפילה הטבעית** של הגופים כלפי הקרקע. במדע העתיק היה גם מושג הפוך – "**קלות**": הסיבה לעלייה טבעית, למשל, של אש או אוויר חם. בחלק הבא של הספר נראה סיבות לכך שהמושג "קלות" נעלם מהפיזיקה.





במאה ה-17 עם ההתפתחות המדהימה של המכניקה ופיתוח חוק המשיכה העולמית בין כל שני גופים ביקום, קישר ניוטון כוח זה לקיומו של המשקל, ואף הגדיר את המשקל ככוח המשיכה הכובדית. בהרבה מקרים בחיי היום-יום הגדרה זו אינה מביאה לתוצאות גרועות, אם כי יכולה להיות בעייתית.



אלברט איינשטיין
1955 -1887

אולם המצב השתנה במאה ה- 20, עם התפתחות הפיזיקה המודרנית. בעקבות פיתוח תורת היחסות על ידי איינשטיין השתנו גם ההגדרה וההבנה של המושג "משקל". למרות שספרי פיזיקה אחדים ממשיכים להציג את הגדרתו של ניוטון בחרנו להגדיר **משקל** באופן המתאים לפיזיקה, כפי שמקובלת בתקופתנו:

משקלו של גוף הוא התוצאה של שקילתו.

בהמשך לימודי הפיזיקה יובן גם, מדוע בהגדרת המשקל חל שינוי מהותי לעומת זה שהיה מקובל בפיסיקה הקלאסית, אחרי עבודתו של ניוטון במאה ה-17.

כדרכנו, לצורך הגדרת המושג נצפה בהדגמה.



נחזיק מד כוח, שמשקולת תלויה בקצהו (מצב 1 באיור). פעולה זאת מכונה **שקילה**. אם ננתח את הכוחות הפועלים על המשקולת, נסיק, שעל המשקולת פועלים **כוח הכובד** כלפי מטה, וכוח אלסטי שמפעיל הקפיץ ,שבתוך מד הכוח, על המשקולת, כלפי מעלה.

האם כוח הכובד הוא הגורם הבלעדי לכך שהקפיץ נמתח והתארך? לא נראה כך. הרי יחד עם כוח הכובד קיימת תגובה אלסטית של הקפיץ. אך כדי להבין יותר נראה, מה קורה ברגע שנעזוב את מד הכוח (מצב 2 בתרשים).

ניתן לראות שמיד עם התחלת הנפילה של מד הכוח, הקפיץ שבתוכו **חוזר למצבו הרפוי**, ומד הכוח מראה קריאה **אפס**. ברור שכוח הכובד לא הפסיק לפעול על המשקולת בזמן נפילתה, ולמרות זאת מד הכוח לא הראה קריאה כלשהי. אם כך הדבר, נסיק שאומנם כוח הכובד הוא שיכול לגרום לתגובה אלסטית (להתארכות) של הקפיץ, אך קיימים גם מצבים בהם הקפיץ אינו מעיד על כוח הכובד, למשל בזמן נפילה חופשית, כאשר המשקל מתאפס (**מצב חוסר משקל**).

כאמור, שינוי מצבו של הקפיץ בתוך מד- הכוח משקף את כוח התגובה האלסטית של הקפיץ. במצב 1 על הגוף התלוי פועלים כוח הכובד והכוח האלסטי, המאזנים זה את זה (מצב מנוחה). במצב 2, בנפילה, על הגופים פועל רק כוח הכובד, והוא **גורם לשינוי** מצב תנועתם של הגוף ושל מד הכוח – נפילה חופשית.

קריאת האפס של מד- הכוח מהווה עדות ניסיונית לכך, שבנפילה חופשית הגופים נופלים באותו קצב, ואינם מעיקים זה על זה.

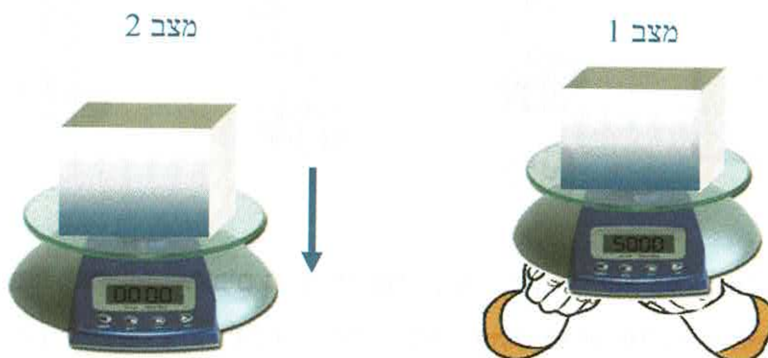
בכל מקרה, הגורם הנמדד ישירות **בשקילה** על ידי מד- הכוח הוא **הכוח האלסטי**.
נסכם:



אנו רואים שתוצאות השקילה יכולות להשתנות ,

בזמן שכוח הכובד נשאר ללא שינוי.

נתבונן שוב בשני המצבים שניתחנו (החזקת מד- כוח ביד ועזיבתו), אלא שהפעם, במקום מד- כוח קפיצי עם תליית משקולות, נשתמש במאזני קפיץ, בהם מניחים משקולת על צלחת.



במצב הראשון, כאשר המאזניים מוחזקים במנוחה, המאזנים מראים קריאה מסוימת. **במצב השני**, כאשר המאזניים נופלים עם המשקולת, קריאת המאזניים תהיה אפס. גם כאן אנו עדים לכך שהגוף (המשקולת) אינו מעיק על תמיכתו (המאזניים) – מצב של חוסר משקל.

על סמך ההדגמות כהכללה נסיק: מד כוח, מאזני קפיץ, או כל מכשיר (גוף) אחר, מודדים את הכוח שמעיק עליהם, בין אם זה כלפי מעלה (תלייה על חבל או קפיץ), ובין אם זה כלפי מטה (הנחה על תמיכה). כאמור, **כוח זה** מגדיר את **המשקל של הגוף** המעיק.

הגדרה:

משקל- הכוח בו מעיק גוף באופן טבעי על התמיכה שלו.

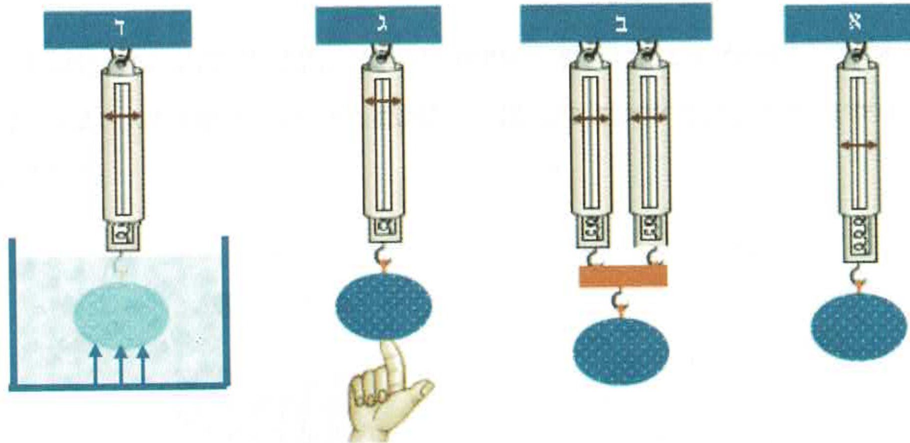
כדי להבהיר יותר את המושג החדש, נתבונן בארבעה מצבים שונים המתארים שקילה:

מצב א' – שקילה באמצעות מד כוח ללא התערבות חיצונית.

מצב ב' – שקילה באמצעות שני מדי כוח, הקשורים לאותו גוף.

מצב ג' – שקילה באמצעות מד כוח ותמיכת יד.

מצב ד' – שקילה באמצעות מד כוח של הגוף, הטבול במים.



בכל אחד מארבעת המצבים נקבל קריאות שונות. רק הקריאה **במצב א'** מהווה **שקילה תקנית**, ואת התוצאה ניתן לאמץ כמשקל הגוף. **התערבות של גורם חיצוני** בכל אחד מהמקרים האחרים משנה את קריאת מד הכוח.

במצב ב' "מתערב" מד- כוח נוסף. התמיכה של הגוף בשקילה מתחלקת בין שני מדי כוח, וזה משנה משמעותית את הקריאה של מד- הכוח האחד, ומקטינה אותה פי שניים.

במצב ג' היד מספקת תמיכה נוספת בגוף, ויכולה לשנות את הקריאה של מד- הכוח לערך כלשהו. ברור ששקילה זאת היא חסרה כל משמעות.

במצב ד' התמיכה הנוספת באה מהנוזל, שבו טבול הגוף. גם כאן תוצאות ה"שקילה" יכולות להשתנות בהתאם לצפיפות הנוזל ולצפיפות חומר הגוף. בהמשך נלמד תופעה זו.

אנו מסכמים: רק השקילה **במצב א'** היא התקינה. **כוח הכובד** יכול לגרום ל**משקל**, אך **שני מושגים אלה אינם זהים**.

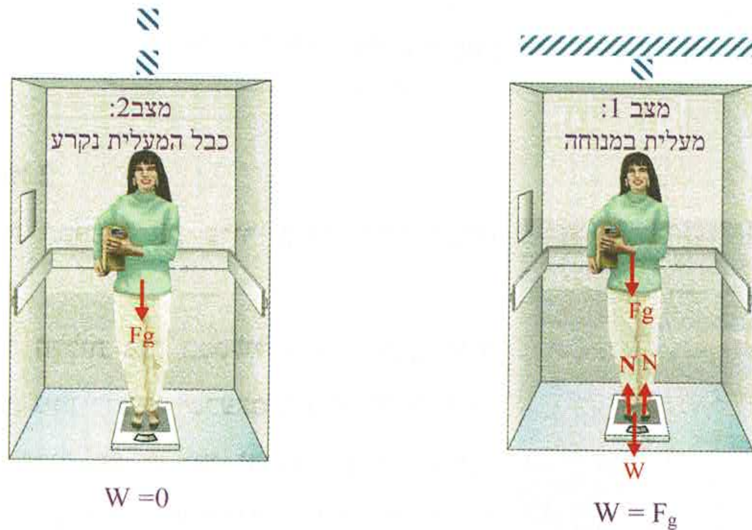
כמו כל כוח, נמדד גם המשקל ביחידות **ניוטון**. יחידות אחרות הנמצאות בשימוש הן **קג"כ** (קילוגרם כוח) **וגר"כ** (גרם כוח).

חוסר משקל ו"חוסר משקל"

כאמור, משקל הגוף קשור לתחושת הכובד, כאשר מנסים להרים אותו. במצב נפילה חופשית מתקיים מצב של **חוסר משקל**, ולכן- היעדרות תחושת כובד. נתייחס כאן למצב מיוחד, המלווה גם הוא בתחושה של קלות, אך מצב זה אינו מצב של חוסר משקל.

דוגמה 1

תחילה נדמיין מעלית **במנוחה**, בתוכה עומדת אישה על מד כוח (מאזני קפיץ). במצב זה הכוחות הפועלים **על האישה** הם כוח הכובד (F_g) והכוח הנורמלי (N) של המאזניים. בעצם אלו שני כוחות נורמליים, הפועלים על רגלי האישה. מאחר והשפעת כוחות המגע היא הדדית, רגלי האישה לוחצות על משטח מד- הכוח, עליו היא עומדת. זהו כוח המשקל (W) (מצב 1).



עתה, אם מסיבה כל שהיא כבל המעלית ניקרע (מצב 2), והמעלית נופלת בנפילה חופשית. האישה לא תעיק על המאזניים, והם יראו משקל אפס : W=0 .

במצב חוסר משקל זה תהיה לאישה הרגשת קלות מלאה. היא לא תלחץ כלל על המאזניים, וזו תחושה מאוד מיוחדת. למעשה, לא רק שהיא לא תלחץ על המאזניים, אלא כל האברים שבתוך גופה לא ילחצו זה על זה. האישה מרחפת ללא משקל. (זוהי תחושה של צנחן לפני פתיחת המצנח או גם של קופץ בנג'י).



קופצת בנג'י- חסרת משקל



צנחנים לפני פתיחת המצנח- חסרי משקל

לא נרחיב את הדיבור על המצב, בו אין אפשרות הליכה במעלית, כשכל הגופים שבתוכה מרחפים. **אין מעלה ואין מטה.** מושגים אלה מותנים בקיום המשקל.

במצב של חוסר משקל אין משמעות למושגים מעלה ומטה.

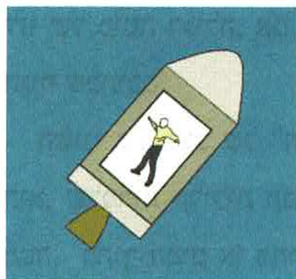
דוגמה 2



חללית הסובבת את כדור הארץ ללא פעולת מנועים.

כאשר חללית נעה במסלול מעגלי סביב כדור הארץ, ניתן לדמיין, שבעצם היא נופלת חופשית כלפי כדור הארץ, ובו זמנית מתרחקת ממנו, הודות למהירות המשקית, שיש לה (עיינו באיור).

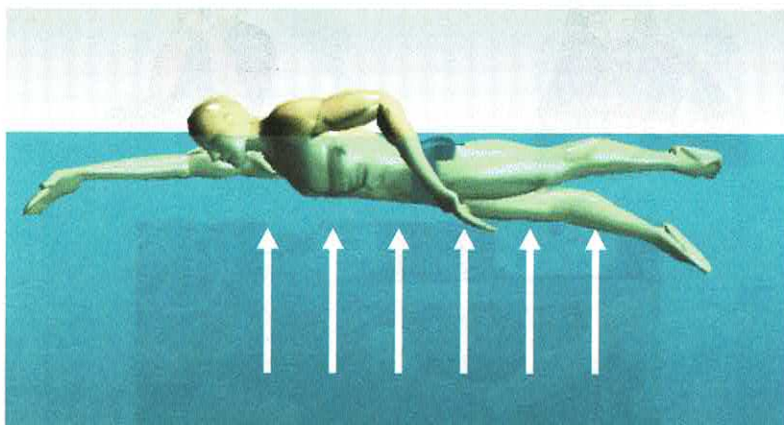
החללית אינה מתנגשת בקרקע, כי שתי התנועות של התרחקות מכדור הארץ והתקרבות לכדור הארץ מתקזזות בדיוק, והיא ממשיכה לעקוף את כדור הארץ במהירות גבוהה, "מפספסת" את הירידה, ונשארת במסלול מעגלי קבוע.



על החללית וכל מה שבתוכה פועל כוח הכובד מצד כדור הארץ, וגורם לה ולגופים שבתוכה ליפול נפילה חופשית. כפי שכבר ראינו, נפילה חופשית מלווה במצב של חוסר משקל, כאשר כל הגופים בתוך החללית אינם מעיקים זה על זה ומשקלם שווה בדיוק **לאפס**. במצב זה חשים האסטרונאוטים לא רק לרגע אחד (כמו שלפעמים בתוך המעלית או מטוס) אלא למשך זמן ארוך מאוד. אומנם בעיקרון זוהי אותה תחושה כמו במעלית הנופלת, אך כמובן משך הזמן הארוך יוצר מציאות מיוחדת במינה בתוך החללית. כל העצמים שבתוך החללית מרחפים ואין בתוכה משמעות למושגים **מעלה ומטה**. תופעות פיזיקאליות רבות, בהן תפקיד חשוב למשקל (כמו בעירה, התנהגות נוזלים וכו'), מתרחשים באופן שונה לגמרי. כמו כן, גם בתהליכים הביולוגיים מתרחש שינוי. מעניין וגם נעים להיחשף לפרק זמן קצר למצב של **חוסר משקל אמיתי**, ואולם חשיפה ממושכת מאוד של האדם למצב זה גורמת לנזקים בלתי הפיכים (זהו הגורם המגביל את השהייה של האסטרונאוטים בתחנות החלל).

דוגמא 3

מצבי חוסר המשקל שהצגנו עד כה אינם זהים למצב הקלילות שחש, למשל, צוללן או שחיין, הצף במים.



אם היינו מודדים את משקלו של הצוללן בעזרת מד כוח, מד הכוח לא היה מראה קריאה כלשהי. הסיבה לכך: שקילה שאינה תקינה. זאת משום שישנה תמיכה מלאה מצד הנוזל, המפעיל כוח כלפי מעלה על הצוללן ומאזן את כוח הכובד. למעשה, תמיכת הנוזל דומה

לזו של מיטה רגילה, אם כי כוחות התמיכה מופעלים במגוון כיוונים: המים עוטפים את הגוף שבתוכם.

השוני בין מצב של "חוסר משקל" בשעת ציפה לבין מצב של **חוסר משקל** בחללית הוא, שלמרות קלילות תנועותיו (בציפה) אין לאדם קושי להרגיש את הכיוונים מעלה - מטה. בתוך המים או מחוץ להם הוא חש הבדל מתוך הלחצים הפנימיים בתוך הגוף. זהו המשקל הפנימי, שאנו במצב הרגיל לא מודעים לו, אך כאשר הלחץ פוסק, מיד מופיעה הרגשה פנימית מיוחדת, ברגע ראשון אנו מרגישם תחושה לא נעימה, בה עולה הבטן מעלה. כל זאת כתוצאה של התכווצות שרירי חלל הבטן, הרגילים למשקל קבוע של איברי מערכת האיכול.

כל זה לא קורה לצוללן, ולכן את מצבו ניתן לכנות בשם **"חוסר משקל מדומה"**. עיקר ההבדל בינו לבין חוסר משקל שחש האסטרונאוט הוא, שבתוך הנוזל נשמרת משמעות הכיוון **מעלה- מטה**.

במצב של חוסר משקל
אמיתי אין תחושת הכיוון
מעלה - מטה



במצב של "חוסר משקל"
מדומה נשמרת תחושת הכיוון
מעלה - מטה





"אין ספק שהחוויה הכי גדולה היא הריחוף. אנחנו ישנים בתוך ארון כזה, מרחפים בפנים. זה ממש כיף, אנחנו משתעשעים עם זה כל הזמן."



צוות הקולומביה
תצלום זה נתגלה בסרט ששרד את הנפילה ופותח רק אחרי התאונה.



אל"מ אילן רמון

(01.02.2003 – 20.06.1954)

טייס החלל הישראלי הראשון.
שימש מומחה מטען בצוות מעבורת החלל קולומביה. ב-1 בפברואר נספה יחד עם צוות המעבורת,שהתפרקה עם חזרתה לאטמוספרה של כדור הארץ.

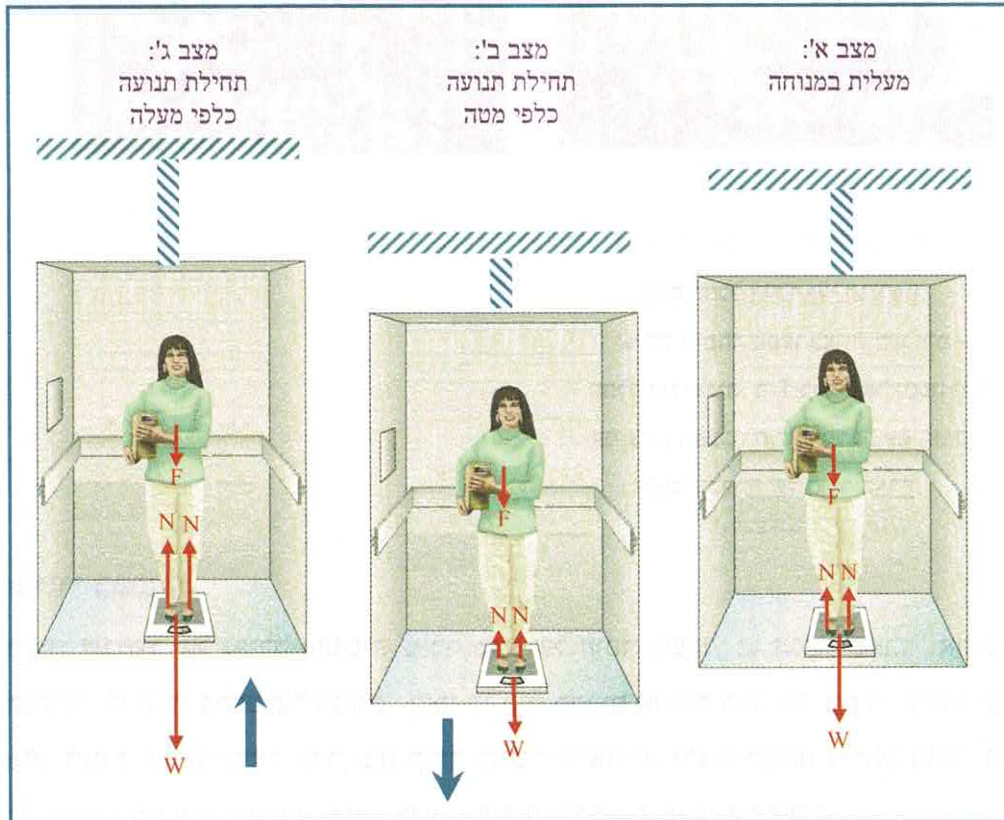
שינוי במשקל

ראינו שבמצב של נפילה חופשית שורר מצב של חוסר משקל, בו הגוף "מאבד" את כל המשקל, שיש לו במצב של מנוחה. האם קיימים מקרים אחרים בהם משתנה המשקל? על מנת לענות על כך נראה עתה, מה קורה כאשר המאזניים והגוף המונח עליהם נעים יחד כך, שמצב תנועתם משתנה בקצב, השונה מזה המתרחש בנפילה החופשית.

דוגמא מס' 4

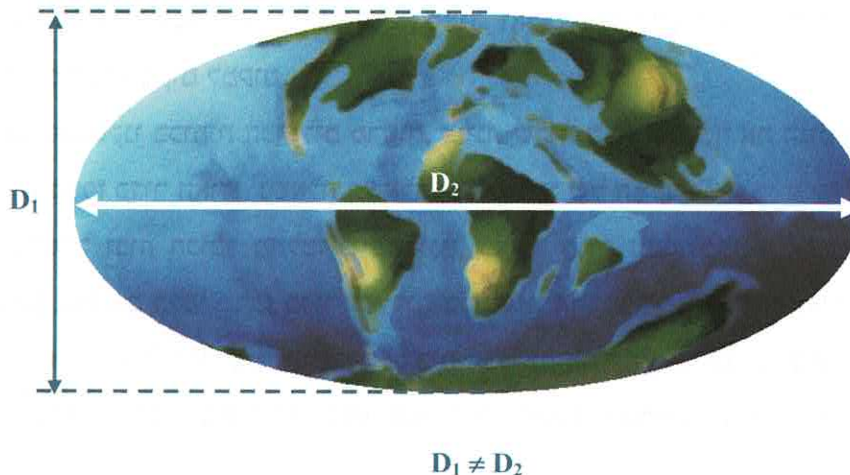
שוב נדמיין מעלית ואדם העומד בתוכה על המאזניים (**מצב א'** באיור). כאשר המעלית מתחילה לרדת (**מצב ב'**) בקצב עולה, האדם מרגיש שהרצפה "בורחת" ממנו, והוא מעיק עליה פחות. במצב זה מאזני הקפיץ יורו על **משקל קטן** מהמשקל, שהיה לאדם במעלית נייחת. כלומר, במצב זה מתרחשת **הפחתה של משקל**.

עתה המעלית מתחילה לעלות בקצב עולה (**מצב ג'**). האדם מרגיש שהרצפה "דוחפת" את רגליו כלפי מעלה והוא, בהתאם, מעיק עליה חזק יותר מאשר במנוחה. במצב זה מאזני הקפיץ יורו על **הגדלת המשקל** מזה שבמנוחה. זהו גם המצב, בו חשים אסטרונאוטים בזינוק של ספינת חלל מפני כדור הארץ. אדם אינו יכול לשרוד הגדלת משקל ביותר מ:פי- 6, ושום אימון לא יעזור, כי מדובר ביכולת השרירים הפנימיים, (לב, בית החזה).



א. ציינו **שכוח הכובד** הוא הגורם **למשקל** בחיי היום- יום, אם כי לא היחיד האפשרי. אך גם כוח הכובד הפועל על גוף מסוים אינו בעל גודל קבוע, אלא משתנה ממקום למקום על פני כדור הארץ. כוח הכובד, הפועל על הגופים על פניו, משתנה עקב הפחיסות של כדור הארץ. "כדור הארץ" אינו כדור מושלם: הקוטר בקו המשווה (D_2) גדול מהמרחק בין הקטבים (D_1). עקב כך יפעל על הגוף המצוי בקטבים כוח כובד גדול יותר. בהתאם תשתנה גם תוצאת השקילה.

בנוסף לכך, גם סיבוב כדור הארץ סביב צירו ישפיע על תוצאות השקילה. זאת משום שגוף המשתתף בתנועה סיבובית משנה את מצב התנועה בקצב מסוים. כפי שראינו, שינויי מצבי התנועה גורמים לשינויי משקל. מתברר, שהסיבוב העצמי של כדור הארץ מוסיף איבוד משקל לכל הגופים, המצויים על קוו המשווה בהשוואה למשקלם בקוטב. כלומר, על תוצאות השקילה התקנית של גופים שעל פני כדור הארץ משפיעים גם הפחיסות של כדור הארץ, וגם הסיבוב שלו סביב צירו.



$D_1 \neq D_2$

כוח כובד פועל בין הגופים בכל מקום ביקום. מתברר שעל פני הירח, למשל, כוח הכובד, שיפעל על גוף מסוים מצד הירח, יהיה קטן פי 6 מזה שיפעל על אותו גוף על פני כדור הארץ. על פני השמש הוא גדול פי 27.8. בהתאם, ישתנה משקלם של גופים, המצויים במקומות אלה.



משקלו של גוף יכול להשתנות על פני גרמי שמים שונים בהתאם לגודלם ולסיבובם. לאותו גוף יהיה משקל שונה על הירח או על כוכבי לכת שונים.

אנחנו רואים, שמשקלו של גוף יכול להשתנות, כאשר מצב תנועתו משתנה. אם כן, **מדוע אנו משייכים לגופים שונים משקל מסוים?**

כאשר אנחנו מציינים משקלו של גוף, אנו מתכוונים בעצם לתוצאה של שקילה תקנית במקום מסוים על פני כדור הארץ. תוצאה זאת תשתנה במקומות אחרים על פני כדור הארץ. במקרים רבים אנו מזניחים את השינויים במשקל, הנמדד בין מקומות שונים. ההבדל בין משקל הגוף המצוי בקוטב למשקלו בקו המשווה הוא כ-3%. זה, כמובן לא מעט ולא הרבה. הכול תלוי בנסיבות: בן אדם לא ירגיש בהבדל במשקלו, אך כאשר מדובר בשקילה מסחרית, 3% זה הרבה מאוד, ואכן במסחר הבינלאומי מתחשבים בהבדלי כיול המשקל ממקום למקום.

ב. כשעסקנו בכוחות הפועלים מרחוק, ציינו, **שכוח הכובד** מושך את הגופים כלפי מטה בכיוון מרכז כדור הארץ. נשאלת השאלה: **מה כיוונו של המשקל?**

המשקל וכוח הכובד מתלכדים בכיוונם, כאשר הגוף נמצא בקוטב או בקו המשווה: שניהם מכוונים כלפי מרכז כדור הארץ. במקומות אחרים על פני כדור הארץ המצב הוא שונה, אך ניתן להזניח שוני זה עבור מרבית המטרות בחיי היום- יום. במציאות של תחנות חלל כיוון המשקל יכול להיות ללא קשר לכוח הכובד, בהתאם לאופי התנועה של תחנת החלל.

סיכום משקל:

1. משקל מציין את הכוח, שבו מעיק גוף על תמיכתו (מד כוח, מאזני קפיץ וכד').
2. כאשר גופים נופלים נפילה חופשית, מתקבל מצב של חוסר משקל.
3. כאשר גוף ותמיכתו משנים תנועתם בקצב השונה מהקצב, שבו גופים נופלים חופשית (במעלית), מתקבלת הגדלה או הפחתה של המשקל בהתאם לכיוון שינוי התנועה.
4. משקל הוא תוצאה של שקילה, הנמדדת בעזרת מד-כוח. יחידת המשקל היא: ניוטון.
5. המיקום הגיאוגרפי על פני כדור הארץ משפיע על משקל הגופים. כדי להשוות בין משקלים של גופים, יש למדוד אותם במצב מנוחה ובאותו מקום על פני כדור הארץ.
6. כיוונו של המשקל במנוחה במצבי היום- יום הוא כלפי מרכז כדור הארץ (אנו מזניחים את השפעת הסיבוב של כדור הארץ על השינוי בכיוון המשקל).



1) לגבי משקל- האם נכון ש:

א. המשקל קבוע כשהשקילה מתבצעת באותו המקום?

ב. המשקל תמיד מכוון כלפי כדור הארץ?

ג. המשקל אינו תלוי רק בגוף?

ד. כל התשובות נכונות?

2) במצב של חוסר משקל:

א. לא פועל כוח הכובד על הגוף.

ב. פועל כוח הכובד על הגוף.

ג. לא פועל כוח הכובד על התמיכה של הגוף.

ד. כוח הכובד פועל רק על התמיכה של הגוף, ולא על הגוף עצמו.

3) גוף תלוי על מד כוח הנמצא בתקרת מעלית שבמנוחה (ראה סרטוט).



כאשר המעלית תתחיל לעלות:

א. מד הכוח יורה משקל גדול יותר.

ב. מד הכוח יורה משקל קטן יותר.

ג. מד הכוח לא ישנה את קריאתו.

ד. מד הכוח יורה קריאה- אפס.

4) יחידותיו של המשקל הן:

א. קילוגרם.

ב. גרם.

ג. קילוגרם כוח.

ד. כל התשובות נכונות.

5) מבין ארבעת המקומות הבאים, המשקל הנמדד במצב מנוחה של אותו גוף הוא הקטן ביותר:

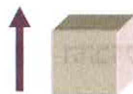
א. בקטבים.

ב. בקו המשווה.

ג. בירח.

ד. בשמש.

6) גוף נזרק כלפי מעלה ונע באוויר (ראה סרטוט). במצב זה:



א. משקלו של הגוף אינו משתנה.

ב. הגוף חסר משקל.

ג. משקלו של הגוף קטן.



ד. משקלו של הגוף גדל.

7) משקלו של גוף, הנמצא במנוחה על פני כדור הארץ, הוא 6 ניוטון. משקלו במצב של מנוחה על הירח יהיה:

א. 36 ניוטון.

ב. 12 ניוטון.

ג. 0.6 ניוטון.

ד. 1 ניוטון.

8) האם נכון ש:

א. כוח הכובד והמשקל מכוונים כלפי מרכז כדור הארץ?

ב. כוח הכובד והמשקל פועלים על גופים שונים
(הכובד- על הגוף, המשקל- על התמיכה)?

ג. כוח הכובד הוא אחד מהגורמים למשקל?

ד. כל התשובות נכונות?



משקל

1. הגדירו מהו משקל.
2. האם על גוף חסר משקל פועל כוח הכובד? נמקו!
3. ציינו מקרים מחיי היום- יום, בהם הינכם חשים בתופעה של במשקלכם או הגדלה בו.
4. מהו ההבדל בתחושה של אדם, הנמצא במצב של חוסר משקל אמיתי , לבין התחושה של אדם, הנמצא במצב של חוסר משקל מדומה?
5. במה תלוי משקלו במנוחה של גוף מסוים?
6. מהו התנאי לכך, שהמשקל במנוחה של גוף יישאר קבוע?
7. מהן היחידות המקובלות למשקל, ובעזרת איזה מכשיר הוא נמדד?
8. באילו מקומות על פני כדור הארץ יהיה משקל מנוחה של גוף:
   א. מקסימאלי? ב. מינימאלי? הסבירו!
9. האם כוח הכובד והמשקל זהים? על מה פועל כוח הכובד ועל מה פועל המשקל?
10. ציינו מקרים, שבהם כוח התגובה האלסטית (הכוח הנורמלי) שווה בגודלו למשקל הגוף, המונח על המשטח, ומקרים שבהם כוח התגובה האלסטית קטן בגודלו ממשקל הגוף, המונח על המשטח.



שאלות חישוב



1. גוף תלוי על חוט אנכי. על הגוף פועל כוח כובד של 30 ניוטון.

א. מהו משקלו של הגוף ?

ב. ברגע מסוים החוט נקרע. מהו גודלו של כוח הכובד ומהו משקלו במהלך תנועתו באוויר ?



2. גוף תלוי על מד כוח, הנמצא בתקרת מעלית במנוחה. במצב זה מד הכוח מורה על 50 ניוטון. כאשר המעלית מתחילה לעלות, מד הכוח מורה קריאה, השונה ב- 20 ניוטון לעומת הקריאה הקודמת.

א. מהו משקלו של הגוף, כשהמעלית נמצאת במנוחה ?

ב. מהו משקלו של הגוף, כשהמעלית מתחילה לעלות ?

ג. מהו כוח הכובד, הפועל על הגוף, כשהמעלית מתחילה לעלות ?

3. גוף תלוי על מד כוח, הנמצא בתקרת מעלית במצב של במנוחה. במצב זה מד הכוח מורה על 40 ניוטון. כאשר המעלית מתחילה לרדת, קריאת מד הכוח משתנה ב- 10 ניוטון.

א. מהו משקלו של הגוף, כשהמעלית מתחילה לרדת ?

ב. מהו כוח הכובד, הפועל על הגוף, כשהמעלית מתחילה לרדת ?

4. ידוע, שעל הירח כוח המשיכה, הפועל על הגופים, קטן פי 6 מזה שעל הארץ.

א. משקלו של גוף במצב של מנוחה על פני כדור הארץ הוא 60 ניוטון. מה יהיה משקלו במצב של מנוחה על הירח ?

ב. משקלו במצב של מנוחה של גוף על הירח הוא 1 ניוטון.

מה יהיה משקלו במצב של מנוחה על פני כדור הארץ ?



5. כדור נבעט כלפי מעלה. ידוע, שבזמן תנועתו כלפי מעלה פועל על הכדור כוח כובד, שגודלו 5 ניוטון.

א. מהו משקלו במהלך עלייתו ?

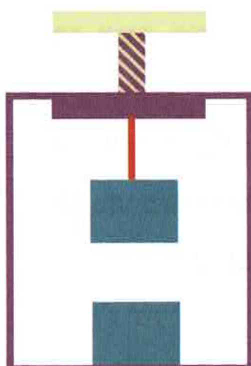
ב. מהו משקלו במהלך ירידתו ?

ג. מה יהיה משקלו כשהוא יחזור לקרקע ?

6. על רצפת מעלית מונח גוף, שגודלו של כוח הכובד, הפועל עליו שווה, ל- 10 ניוטון. לתקרת המעלית מחובר תלוי בעזרת חוט גוף זהה לחלוטין (תרשים).

א. שרטטו את הכוחות הפועלים על הגוף התלוי ועל הגוף המונח במעלית.

ב. מה גודלו של כל אחד מהכוחות ?



ג. כשהמעלית מתחילה לעלות, גדל משקלו של הגוף, המונח על הרצפה, ב- 10 ניוטון.

1. מהו משקלו של הגוף התלוי במצב זה ?
2. מה גודלו של כוח הכובד, הפועל על כל אחד מהגופים, במצב זה ?

ד. מה יהיה משקלו של כל אחד מהגופים, אם ייקרע כבל המעלית ?

ה. כשכבל המעלית נקרע, מהו גודלו של כוח הכובד, הפועל על כל אחד מהגופים?

תשובות

1. א. 30 [N] ב. 30 [N] ; 0 2. א. 50 [N] ב. 70 [N] ג. 50 [N]

3. א. 30 [N] ב. 40 [N] 4. א. 10 [N] ב. 6 [N]

5. א. 0 ב. 0 ג. 5 [N] 6. ב. 10 [N] ג. 1) 20 [N] 2) 10 [N]

ד. 0 ה. 10 [N]

פרק ח' - מסה

אחד המושגים המרכזיים בפיזיקה הוא **מסה**. מושג זה הוזכר כשדנו בחוק השני של ניוטון. כדי להגדיר את המושג כמקובל בפיזיקה, נבצע מספר הדגמות, וננסה לפרש אותם. בניסויים אלה נזדקק למכשיר הנקרא **רשם-זמן**. זהו מכשיר המקיש על סרט נייר, העובר דרכו, ברווחי זמן שווים. הנקודות שנשארות על הסרט מייצגות את התנועה של הסרט: כשהסרט נע בקצב אחיד, הנקודות מופיעות על הסרט ברווחים שווים. כשהסרט מגדיל את מהירותו הנקודות מופיעות על הסרט במרווחים ההולכים וגדלים כשהסרט מאט, הרווחים נעשים קטנים יותר. בעזרת רשם-זמן, אם כן, ניתן לעקוב אחר אופן התנועה של גוף, הקשור לסרט, ולדעת, אם מצב תנועתו משתנה או נשאר ללא שינוי (עיין באיורים).

נזכיר ש: כך נראה רישום התנועה, כאשר גוף נע בקצב קבוע (במהירות קבועה) :



כך נראה רישום התנועה, כאשר גוף נע במהירות עולה:



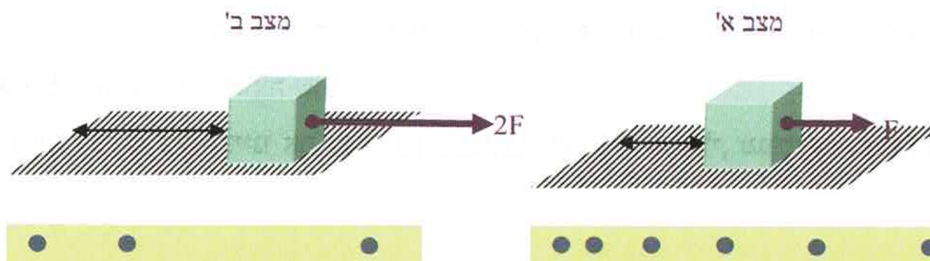
כך נראה רישום התנועה כאשר, גוף נע במהירות יורדת :



הדגמה מס' 1

מצב א'

גוף מונח על משטח אופקי חלק. נקשור לגוף סרט של רשם – זמן. ברגע שנמשוך את הגוף ימינה בכוח אופקי קבוע, הגוף יתחיל לנוע: הרי הכוח גורם לשינוי מצב התנועה, ואין כוח אחר, שיאזן את הכוח שהופעל.



נבדוק את שינוי התנועה לפי הדיווח של רשם- הזמן. על מידת **השינוי של מצב התנועה** ניתן להסיק לפי **שינוי** המרחק בין שתי נקודות עוקבות על הסרט. התוצאה היא, שהמרחק עולה, כלומר, הגוף מגביר את מהירותו.

מצב ב'

עתה נפעיל על הגוף כוח גדול פי שניים (נוודא זאת בעזרת מד הכוח), ושוב נבדוק את שינוי התנועה שיתקבל. ניתן לראות ,ששינוי התנועה (הפרש המרחקים בין שתי נקודות עוקבות על סרט רשם- הזמן) הפעם היה גדול מאשר במצב הראשון. הגדלת המרווחים היא פי 2. זהו בדיוק השינוי בגודל הכוח הגורר. כלומר, היחס בין הכוח הגורר את הגוף לבין שינוי התנועה, שנגרם לגוף בעקבות כך, נשאר קבוע.



היחס הקבוע בין הכוח לבין השינוי בתנועת הגוף, הנגרם כתוצאה מהפעלת כוח זה, מוגדר בפיסיקה **כמסה של הגוף**. מסמנים אותו באות **m**.

אם על הגוף היו פועלים מספר כוחות, ימינה או שמאלה, כזכור, היינו מסכמים אותם בהתאם לכיוונם, כפי שמסכמים מספרים אלגבריים. לדוגמא: כוח של 5 יחידות ימינה וכוח של 3 יחידות שמאלה מסתכם ב**כוח שקול** של 2 יחידות ימינה.

מסה של הגוף מוגדרת כיחס בין הכוח השקול, הפועל על הגוף, לבין שינוי התנועה, שנגרם בעקבות כך.

$$m = \frac{F_R}{a}$$

ניתן לומר שלגופים שונים ישנה **מסה שווה**, אם הפעלת כוחות שווים גורמת ל**שינויי תנועה שווים** שלהם (תאוצה שווה).

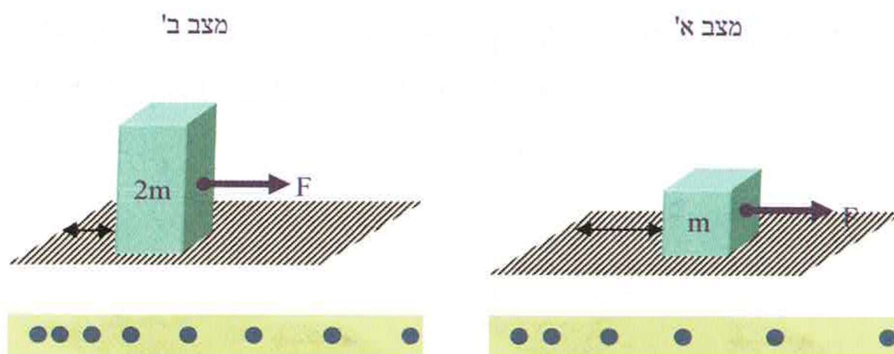
נשים לב גם שלא ציינו את סוג הכוח המופעל (אלסטי, חשמלי, מגנטי או כובד) ולא את גודלו.

מהדגמה זו ומשורת הדגמות הדומות לה ניתן להסיק שתי מסקנות:

1. מסה היא תכונה של הגוף עצמו, סגולה שלו, המאפיינת את תגובתו להפעלת הכוח ומתבטאת בשינוי בתנועתו. המסה אינה תלויה בסוג הכוח, ואינה מושפעת מגודל הכוחות.
2. גודל המסה של הגוף אינו תלוי במיקומו או בתנאי המדידה.

הדגמה מס' 2

שוב ניקח גוף, בול עץ, נניח אותו על משטח אופקי **חלק**, ונפעיל עליו כוח אופקי ימינה (מצב א'). בעזרת רשם-זמן נמצא את שינוי התנועה, שנגרם לגוף. נוסיף ונצמיד מעליו גוף זהה ונפעיל אותו כוח גרירה (מצב ב'). הפעם נקבל, ששינוי התנועה קטן פי 2. ניתן לראות זאת מהמרווחים הקטנים יותר בסרט רשם- הזמן.



על סמך הגדרה של המסה נוכל להסיק מכאן ש:

1. מסה מהווה גורם התנגדות של הגוף לשינוי בתנועתו. במילים אחרות, מסה מאפיינת את מידת ההתמדה של הגוף במצב תנועתו.
2. ככל שמסה של גוף גדולה יותר, קשה יותר לגרום לגוף שינוי בתנועתו.

על סמך ההגדרה של המסה (היחס בין כוח שהופעל על גוף לבין השינוי בתנועתו) והדגמה זו נוכל גם להסיק, שמסה היא גודל, התלוי ביחס ישר בכמות החומר. כל גוף

מורכב מחלקיו, גופים קטנים יותר. לכן, המסה הכוללת של הגוף שווה למסה של כל מרכיביו.

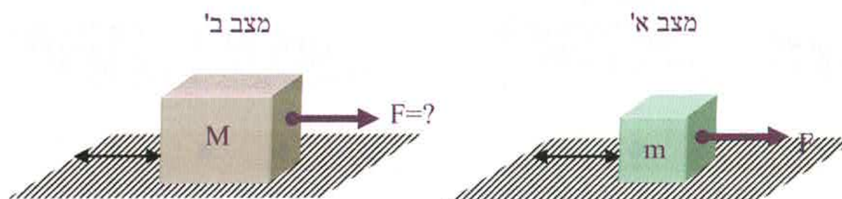
כידוע, חלקיקי יסוד, פרוטונים, נויטרונים ואלקטרונים, מרכיבים את כל החומרים. לאור הנאמר לגבי תכונת המסה להסתכם, הידע של מסות של שלושת החלקיקים האלה מאפשרת להעריך את המסה של כל צירוף שלהם; המסה מייצגת למעשה את **מספר החלקיקים** שבגוף, או פשוט, **כמות החומר** שבו.



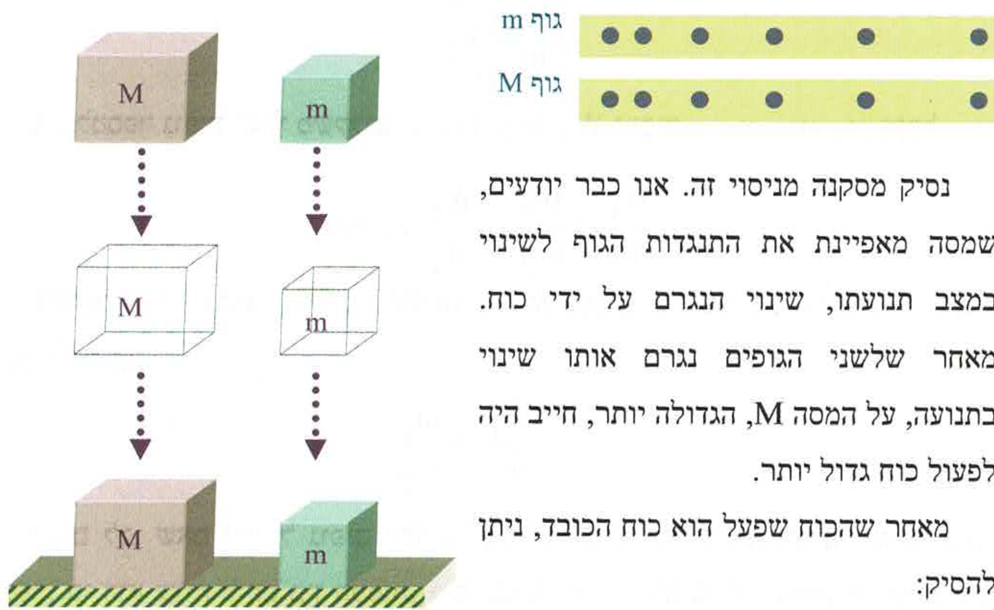
מסה של גוף מסוים מעידה על כמות החומר שבו

הקשר בין מסה לבין כוח הכובד

שוב ניקח בול עץ בעל מסה m המונח על משטח אופקי חלק. נפעיל עליו כוח אופקי F ונגרום לשינוי בתנועתו (מצב א'). ניקח עתה גוף אחר בעל מסה M, גדולה יותר ($m<M$) (מצב ב'), וננסה על ידי הפעלת כוח לגרום לאותו השינוי בתנועה (תאוצה) כמו שהיה לגוף הראשון. ברור לנו כבר, שלשם כך נצטרך להעלות את גודלו של הכוח.



עתה, ניקח את שני הגופים, נרים אותם לגובה מסוים מעל הרצפה, ונשחרר אותם בו זמנית. הם יתחילו ליפול. הניסוי מראה, ששני הגופים מגיעים יחד לרצפה. מעובדה זאת ניתן להסיק, שהשינוי בתנועתם (התאוצה) היה זהה: הם התחילו ליפול ביחד, וביחד סיימו את נפילתם. כלומר, תוך כדי הנפילה בכל רגע ורגע הם היו בגובה זהה. ניתן לוודא זאת, כשנחבר כל אחד מהגופים לסרט רשם-זמן: נקבל סדרות זהות של נקודות על הסרטים.



נסיק מסקנה מניסוי זה. אנו כבר יודעים, שמסה מאפיינת את התנגדות הגוף לשינוי במצב תנועתו, שינוי הנגרם על ידי כוח. מאחר שלשני הגופים נגרם אותו שינוי בתנועה, על המסה M, הגדולה יותר, חייב היה לפעול כוח גדול יותר.

מאחר שהכוח שפעל הוא כוח הכובד, ניתן להסיק:

שיעורו של כוח הכובד הפועל על גוף נמצא ביחס ישר למסתו.

היחס בין כוח הכובד, שפעל על גוף מסוים, לבין מסתו, מאפיין את השינוי בתנועת הגופים הנופלים ארצה. יחס זה הוא קבוע **עבור כל הגופים**, הנמצאים באותו מקום על פני כדור הארץ, ומייצג את **העוצמה של משיכת הכבידה** מצד כדור הארץ במקום זה. נסמן אותו באות g ונקבל:

$$\frac{F_g}{m} = g$$

כזכור, גודל זה מבטא את התאוצה בה נופלים הגופים, כפי שלגלילאו התברר , גופים שונים נופלים בערך באותה תאוצה $g = 9.8\frac{m}{sec^2}$.

F_g הוא כוח הכובד ו-m מסת הגוף. או, עבור מספר גופים עליהם פועלים כוחות כובד $F_1, F_2, F_3 \ldots$ ומסות $m_1, m_2, m_3 \ldots$ נקבל:

$$\frac{F_{g1}}{m_1} = \frac{F_{g2}}{m_2} = \frac{F_{g3}}{m_3} = \ldots = g$$

כפי שטענו, משקלו של גוף במצב מנוחה נובע מכוח הכובד ובקירוב שווה לו. לכן גם עבור היחס בין משקל לבין מסה נקבל אותו יחס:

$$\boxed{\frac{W}{m} = g}$$

או, למספר גופים בעלי משקלים W_1, W_2, W_3 ... ומסות m_1, m_2, m_3 ... נקבל:

$$\frac{W_1}{m_1} = \frac{W_2}{m_2} = \frac{W_3}{m_3} = ... = g$$

קשרים אלה מצביעים על כך, שהיחס בין המשקלים של שני גופים שווה ליחס בין המסות שלהם:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{m_1}{m_2}$$

נשים לב, שאם נשקול גופים אלו על פני הירח, היחס בין המשקלים יישאר אותו מספר, כי הוא שווה ליחס בין המסות, ואלו מאפיינות את התנגדות הגופים לשינוי במצב התנועה – תכונה שאינה קשורה לגודל הכוח המופעל. הניסיון מעיד, שמסות הגופים נשארות אותן מסות בכל מקום.

לדוגמה, שני כדורים בעלי משקל 12 ו- 24 ניוטון על פני כדור הארץ ישקלו על פני הירח 2 ו- 4 ניוטון בהתאמה. כלומר משקלם ישתנה, אך היחס ביניהם היה ויישאר 1:2.

מדידת מסה

ההיבט החשוב ביותר, הקובע את משמעות המושג, הוא דרך מדידתו. איך מודדים מסתו של גוף? ישנן דרכים שונות לכך. נצביע על שתיים, החשובות בניסיון היום- יומי, ושתיהן קשורות לשקילה. לפני זה נציין, שכל מדידה מניחה השוואה למסתו של גוף מסוים, שהוסכם על ידי הקהילה המדעית שהוא ישמש **כגוף תקני**.

כאמור, לגבי המסה, הוסכם כי מסה של 1000 סמ"ק מים מזוקקים בטמפרטורה של 4 מעלות צלזיוס תהווה יחידת **מסה** תקנית. יחידה זאת נקראת **1 ק"ג**. הצורך לציין טמפרטורה, נובע מכך, שמשקל המים משתנה עם שינוי טמפרטורת הסביבה, וזאת בעקבות השינוי בצפיפות המים.

כזכור, עבור **המשקל** הוגדרה יחידת **ניוטון**. 1 ניוטון הוא הכוח המקנה לגוף שמסתו 1 ק"ג תאוצה של 1 מטר חלקי שנייה בריבוע.

בהתאם להגדרת יחידות המשקל והמסה, מסה של 1 ק"ג- משקלה באותם התנאים יהיה 10 ניוטון.

כפי שלמדנו בפרק זה, היחס בין משקל- מנוחה למסה מגדיר את עוצמת הכבידה על פני כדור הארץ. לפיכך:

$$\frac{W}{m}=\frac{10\,[N]}{1\,[kg]}=10\frac{[N]}{[kg]}$$

כלומר, ניתן לאפיין את עוצמת משיכת הכבידה על פני כדור הארץ על ידי המספר:

$$g=10\frac{[N]}{[kg]}$$

את היחס הישר בין המשקל למסה ניתן לנצל לצורך מדידת מסה של גוף כלשהו. ניתן לבצע זאת **בשתי דרכים**.

מדידת המסה בעזרת מאזני קפיץ



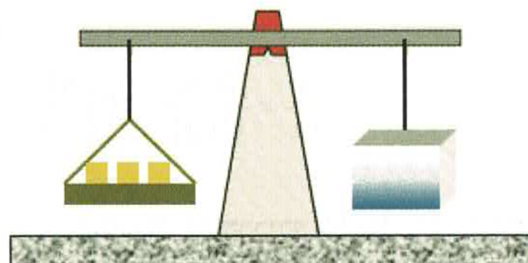
נמדוד את משקלו של גוף במנוחה באמצעות מאזני קפיץ. כפי שלמדנו, על ידי חלוקת המשקל בעוצמת הכבידה g ניתן להגיע למסה.

שיטת מדידה זו אמינה רק כאשר מאזני הקפיץ מכוילים עבור מקום מדידה מסוים. אם נרצה לבצע מדידה דומה במקום גיאוגרפי אחר, נצטרך לכייל מחדש את מד- הכוח, ששימש לנו כמאזניים. הכיול החדש נדרש, כדי שהמכשיר יראה אותו גודל מסה, למרות השינוי במשקל הגוף, המתרחש במעבר ממקום למקום. השינויים במשקל של גופים במעבר בין מקומות שונים על פני כדור הארץ אינם עולים על 3%, אך הכיול הוא, הכרחי לצורך מסחר.

מדידת המסה בעזרת מאזני כפות

בשיטה זו מנצלים את העובדה, שהיחס בין משקלי שני גופים שווה ליחס בין המסות שלהם. השקילה מתבצעת באמצעות מאזניים שווי זרועות. בקצוות המוט, שנתמך באמצע, תלויות כפות. אם נניח על אחת מהכפות גוף, שאת מסתו מעוניינים למדוד, על

הכף יפעל כוח כלפי מטה, שהוא משקל של גוף. על הכף השנייה נניח "משקולות" – גופים בעלי מסה תקנית, כפולה מסוימת של ק"ג.



על שתי הכפות יפעלו כוחות כלפי מטה – משקלי הגופים. כאשר המאזניים מאוזנים, והזרועות הן שוות, מתקיים שוויון במשקלי הגופים, המונחים על הכפות. משוויון זה נובע, שגם המסות שעל שתי הכפות שוות, הרי קיבלנו ש:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

שיטה זו למדידת המסה מבוססת, כפי שרואים, על **השוואת** המשקלים (הכוחות), הפועלים על כפות המאזניים. מאחר שמשווים כוחות (ולא מודדים אותם כמו בשיטה הקודמת) תהיה שיטה זו תקיפה גם, אם נעביר את המאזניים למקום גיאוגרפי אחר (ואפילו לירח). אין צורך בכיול כלשהו באותה מידה של דיוק. על הירח תימשך כל כף פי 6 פחות, אך כל המסקנות לגבי המסה, שהסקנו קודם לכן, נשארות קבילות ותקפות.



מאזני כפות משווים כוחות, לכן תשארנה תוצאות מדידת המסה קבילות ותקפות בכל מקום ללא צורך בכיול המאזניים

סיכום מסה:

1. היחס בין הכוח הפועל על גוף מסוים לבין ה שינוי בתנועתו עקב הפעלת הכוח מגדיר את מסת הגוף. המסה של גוף מסוים מהווה מידת התנגדותו לשינוי במצב תנועתו.
2. מסה מעידה על כמות החומר שבגוף.
3. מסה של גוף היא גודל קבוע שאינו תלוי במיקום הגיאוגרפי בו מתבצעת המדידה.
4. בין משקל- מנוחה של גוף מסוים לבין המסה שלו קיים יחס ישר.
5. הקשר בין משקל- מנוחה למסה על פני כדור הארץ נתון ע"י הביטוי: $g = \frac{W}{m}$

   g – עוצמת משיכת הכבידה של כדור הארץ (ביחידות: $\frac{\text{ניוטון}}{\text{ק"ג}}$).

   W – משקל- מנוחה של הגוף על פני כדור הארץ (ביחידות ניוטון);

   m – מסתו של הגוף (ביחידות ק"ג)
6. כיחידת מסה תקנית נקבעה מסתם של 1000 סמ"ק מים מזוקקים בטמפרטורה של 4 מעלות צלזיוס. יחידת המסה התקנית היא 1 ק"ג. יחידות נוספות, המקובלות למדידת מסה הן: גרם, מיליגרם, טון.
7. מהעובדה, שקיים יחס ישר בין המשקל לבין המסה, ניתן למדוד מסה של גוף על ידי מדידת משקלו במנוחה, ולחלקו בעוצמת משיכת הכבידה במקום המדידה. בשיטת מדידה זו צריך לכייל מחדש את מד- הכוח, בכל מקום גיאוגרפי.
8. היחס בין משקלי שני גופים שווה ליחס בין המסות שלהן: $\frac{W_1}{W_2} = \frac{m_1}{m_2}$
9. עיקרון הפעולה של מאזני כפות, שבעזרתם מודדים מסות, מבוסס על כך, שיחס המשקלים של שני גופים שווה ליחס המסות שלהם. בשיטת מדידה זו משווים את הכוחות הפועלים על כפות המאזניים. משוויון המשקלים נובע שוויון המסות.



שאלות הבנה וחשיבה- לדיון בכיתה

1) מסתו של גוף תלויה ב:

א. גודל הכוח הפועל על הגוף.

ב. עוצמת משיכת הכבידה במקום בו נמצא הגוף.

ג. שינוי התנועה הנגרם לגוף.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

2) מעוניינים למדוד מסתו של גוף בעזרת מאזני קפיץ. האם נכון ש:

א. הדבר אינו ניתן לביצוע?

ב. הדבר ניתן לביצוע רק על פני כדור הארץ?

ג. צריך לכייל את מד הכוח בהתאם למקום המדידה?

ד. כל התשובות אינן נכונות?

3) גוף תלוי על מד כוח הנמצא בחללית שמקיפה את כדור הארץ. במצב זה:

א. מסתו של הגוף שווה לאפס.

ב. מסתו של הגוף אינה משתנה.

ג. מסתו של הגוף קטנה.

ד. מסתו של הגוף גדלה.

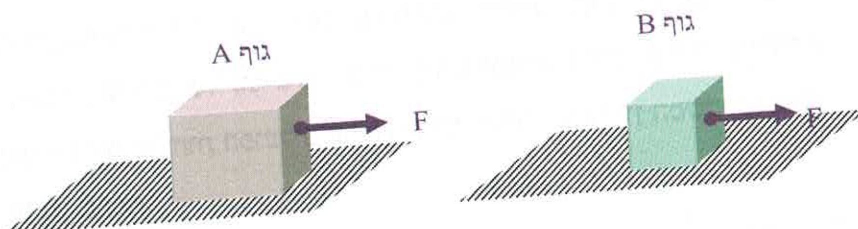
4) שני גופים A ו- B ‏($m_A>m_B$) מונחים על משטח אופקי חלק (כמתואר בסרטוט),
כאשר כוח אופקי זהה מושך את שניהם במשך שנייה אחת. האם נכון שבמשך שנייה זו:

א. שני הגופים יעברו אותו מרחק?

ב. הגוף A יעבור מרחק גדול יותר?

ג. הגוף B יעבור מרחק גדול יותר?

ד. לא ניתן לדעת איזה גוף יעבור מרחק גדול יותר?



5) מסתו של גוף מסוים על פני הירח הוא 6 ק"ג. משקלו של הגוף במנוחה על הירח יהיה:

א. 1 ניוטון.

ב. 6 ניוטון.

ג. 10 ניוטון.

ד. 60 ניוטון.

6) מניחים גוף על מאזני כפות, ומאזנים את המאזניים בעזרת מסות תקניות. כאשר מעבירים את המאזניים מכדור הארץ לירח:

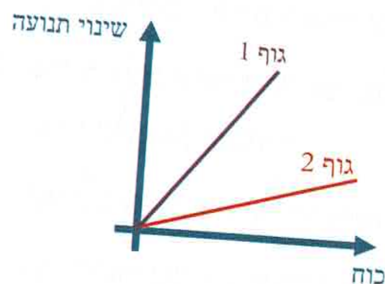
א. איזון המאזניים יופר.

ב. המאזניים יישארו מאוזנים.

ג. לא ניתן לדעת, האם האיזון יופר או יישאר.

ד. המאזניים יטו לצד הכף, שעליה מונח הגוף.

7) התרשים מתאר את השינוי בתנועה שנגרם לשני גופים כתוצאה מהפעלת כוח עליהם.



האם נכון ש:

א. המסה של גוף 1 גדולה יותר?

ב. המסה של גוף 2 גדולה יותר?

ג. המסה של שני הגופים זהה?

ד. לא ניתן לדעת מסתו של איזה גוף גדולה יותר?

8) שני גופים זהים בצורתם ובעלי מסה שונה נופלים חופשית. האם נכון שללא השפעת האוויר:

א. הגוף בעל המסה הגדולה יותר יגיע ראשון לקרקע?

ב. כוח הכובד הפועל על שני הגופים זהה?

ג. שינוי התנועה שייגרם לכל אחד מהגופים יהיה שונה?

ד. כל התשובות אינן נכונות?



מסה

1. הגדירו מהי מסה.
2. מהי יחידת מסה תקנית?
3. האם בעזרת מד כוח ואזני כפות ניתן לקבוע מסה של גופים, במקום שבו לא פועל כוח הכובד? נמקו את תשובתכם!
4. מעבירים מאזני כפות מאוזנים מכדור הארץ לירח. האם המאזניים יישארו מאוזנים? הסבירו!
5. כיצד משפיעים שינויים בכוחות או בתנאי המדידה על גודלה של המסה?
6. שני גופים בעלי מסה שונה נופלים חופשית.
   א. האם גודלו של כוח הכובד, הפועל על כל אחד מהגופים, זהה? נמקו!
   ב. האם לשניהם ייגרם אותו שינוי בתנועה?
7. כוחות זהים פועלים על שני גופים בעלי מסות שונות. האם לשני הגופים ייגרם אותו שינוי בתנועה? הסבירו!
8. תארו, כיצד בעזרת מד כוח ויחידת מסה תקנית ניתן לקבוע מסה של גוף.
9. הסבירו את עקרון הפעולה של מאזני כפות.
10. מלאו את הטבלה הבאה:

	משקל	מסה
הגדרה		
מכשיר מדידה		
יחידות		
תלות במקום המדידה		
תלות בכוחות		



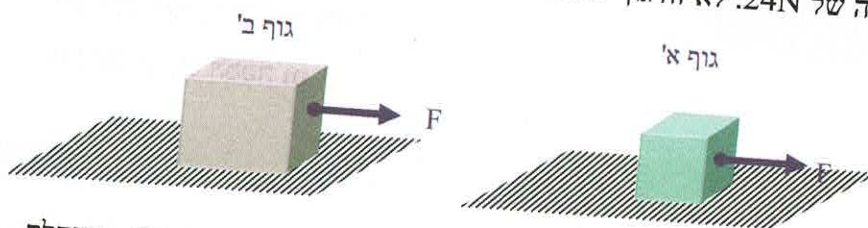
שאלות חישוב

1. מסתו של גוף על פני כדור- הארץ היא 5 ק"ג.
   א. מה תהיה מסתו על הירח ?
   ב. מה יהיה משקלו של הגוף על פני כדור- הארץ ?
   ג. מה יהיה משקלו של הגוף על פני הירח ?

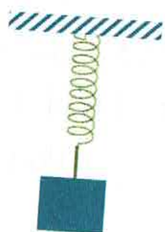
2. משקלו במנוחה של גוף על הירח הוא 6 ניוטון.
   א. מהו משקלו במנוחה על פני כדור הארץ ?
   ב. מהי מסתו של הגוף ?

3. כדור א' משקלו במנוחה על פני כדור- הארץ הוא 24N, ומשקלו של כדור ב' על פני כדור- הארץ באותם התנאים הוא 72N .
   א. מהו משקל כל אחד מהגופים על הירח ?
   ב. מהו היחס בין משקלי הגופים בארץ ובירח ?
   ג. מהי מסתו של כל אחד מהגופים על פני כדור- הארץ ?

4. מסתו של גוף א' - 4 ק"ג ושל גוף ב' – 12. מפעילים על כל אחד מהגופים כוח זהה של 24N. לאיזה גוף תהיה תאוצה גדולה יותר ופי כמה ?



5. גוף שמסתו 4 ק"ג וגוף שמסתו 8 ק"ג, נעזבים יחדיו מאותו הגובה. במהלך נפילתם:
   א. מהו גודלו של כוח הכובד, הפועל על כל אחד מהגופים ?
   ב. מהו משקלו של כל אחד מהגופים ?
   ג. מהו השינוי בתנועה (התאוצה), של כל אחד מהגופים ?
   ד. האם הם יגיעו יחד לקרקע ? נמקו !

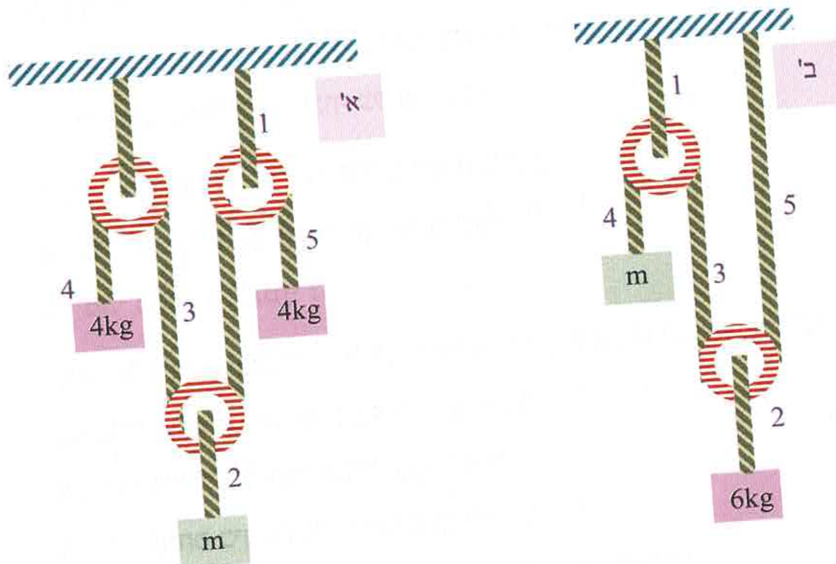


6. גוף שמסתו 2 ק"ג תלוי על קפיץ שקבוע הכוח של $20 \frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$.
   מהי מידת התארכות הקפיץ ?

7. המערכות הבאות נמצאות במנוחה.

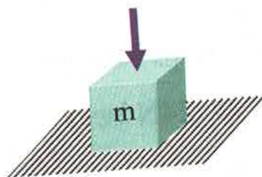
א. חשבו את המתיחות בכל אחד מהחוטים.

ב. מה גודלה של המסה m ?



8. כאשר על גוף שמסתו m, המונח על הרצפה, מפעילים כוח של 20N כלפי מטה, גודלו של כוח התגובה האלסטית הוא 80N .

מה גודלה של המסה m ?



תשובות

1. א. 5 [kg] ב. 50 [N] ג. 8.33 [N] **2.** א. 36 [N] ב. 3.6 [kg]

3. א. 12 [N] , 4 [N] ב. 0.33 , 0.33 ג. 7.2 [kg], 2.4 [kg]

4. לגוף א', פי – 3 .

5. א. 40 [N] , 80 [N] ב. 0 [N] , 0 [N] ג. 10 N/kg ,10 N/kg ד. כן

6. 1 [m]

7. א. 8 [kg] ; חוטים 3,4,5: 40[N] ; חוטים 1,2: 80 [N]

ב. 3 [kg] ; חוטים 3,4,5: 30 [N]; חוטים 1,2: 60 [N]

8. 6 [kg]

פרק ט' - חיכוך

כשעסקנו בכוחות, ציינו, שכוח החיכוך פועל רק בין שני גופים, הנמצאים במגע. במצב זה תיתכנה שתי אפשרויות:

א. הגופים צמודים זה לזה, ולא קיימת תנועה יחסית ביניהם.

ב. הגופים צמודים זה לזה, וקיימת תנועה יחסים ביניהם.

בהתאם לשני מצבים אלה, מבחינים בין שני סוגי חיכוך עיקריים:

1. **חיכוך סטטי** (מנוחה יחסית) - כוח החיכוך פועל בין גופים, הצמודים זה לזה ללא תנועה יחסית ביניהם (לא תמיד קיים חיכוך סטטי בין גופים שבמגע).

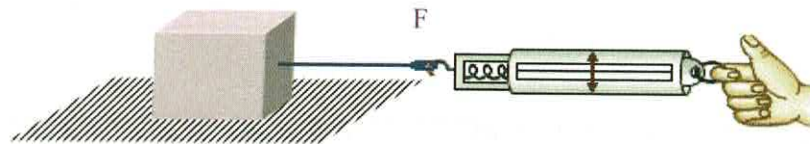
2. **חיכוך קינטי** (תנועה יחסית) - כוח החיכוך פועל בין הגופים, הצמודים והנעים אחד יחסית לשני.

חיכוך סטטי

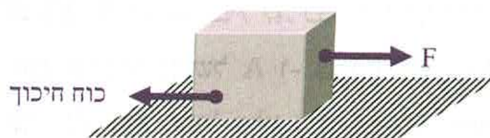
להכרת החיכוך הסטטי ותכונותיו נבצע מספר הדגמות, כאשר בכולן לא קיימת תנועה יחסית בין הגופים שבמגע.

הדגמה מס' 1

נניח בול עץ על שולחן, ולקצהו נחבר מד כוח (ראה סרטוט). בעזרת מד הכוח ננסה לגרור את בול העץ ימינה. ניתן לראות, שמהרגע שאנו מנסים להזיז את הגוף, ומעלים לשם כך את המאמץ המופעל, מד הכוח מראה קריאות גדלות, אבל הבול לא נעתק ממקומו.



ניתוח הכוחות הפועלים על בול העץ במישור האופקי מראה, כי **ימינה** פועל הכוח בו מושך מד הכוח, ומאחר שהבול נשאר במנוחה, פועל על הבול **כוח נוסף**, הגורם לאיזון. כוח זה נוצר בהשפעת השולחן,



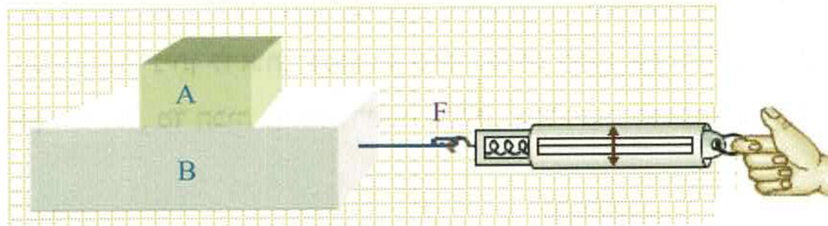
והוא **כוח החיכוך**. נשים לב, שמדובר בהשפעה בכיוון **מקביל** לשטח המגע. כוח החיכוך מופעל **תמיד** בכיוון זה.

כוח חיכוך סטטי פועל במגע בין שני גופים (גוף ומשטח) ומונע תנועה יחסית ביניהם.

נמשיך ונעלה בהדרגה את הכוח המושך עד שנגיע **לכוח המרבי שמעבר, לו הבול יתחיל לנוע**. כוח מרבי זה מהווה את הערך של כוח החיכוך, שבו נמצא הגוף על סף תנועה. כלומר, החיכוך הסטטי נוצר ועולה ברציפות עד לערך מקסימאלי, אשר בו הגוף נמצא על סף תנועה.

הדגמה מס' 2

עתה ניקח שני בולי עץ A ו- B, ונניח את בול A על בול B (כמתואר בסרטוט). ננסה לגרור את שני הבולים לכיוון ימין על ידי הפעלת כוח רק על הבול התחתון. נעלה את כוח המשיכה ימינה בהדרגה, עד שהגופים יתחילו לזוז יחד ימינה. בכך גרמנו לשינוי תנועה של שני הבולים, למרות שהפעלנו כוח על הגוף התחתון בלבד.



אם כללי הכוח שקבענו הם נכונים, עלינו לחפש את הכוח שגרם לשינוי התנועה של הגוף העליון, בזמן בו חל השינוי ממצב תנועתו. ברור, שהבול העליון התחיל לנוע עקב השפעתו של הבול התחתון בכיוון ימין, שהוא כיוון שינוי התנועה של בול B. כוח זה פועל במגע בין הבולים ומקביל לו. כבר הגדרנו כוח כזה ככוח חיכוך.

אם המשטחים של A ו- B היו חלקים לחלוטין, הבול העליון היה נשאר במקומו, כלומר, לא היה פועל עליו כוח בכיוון האופקי, בול B לא היה גורר איתו את בול A בתנועה משותפת ימינה. אם בול A אכן מצטרף לתנועה, פועל עליו כוח בכיוון היווצרות

התנועה. זהו **כוח החיכוך הסטטי**. הפעם, כוח זה לא היה מאוזן, ולכן גרם לשינויי תנועה של הגוף העליון.

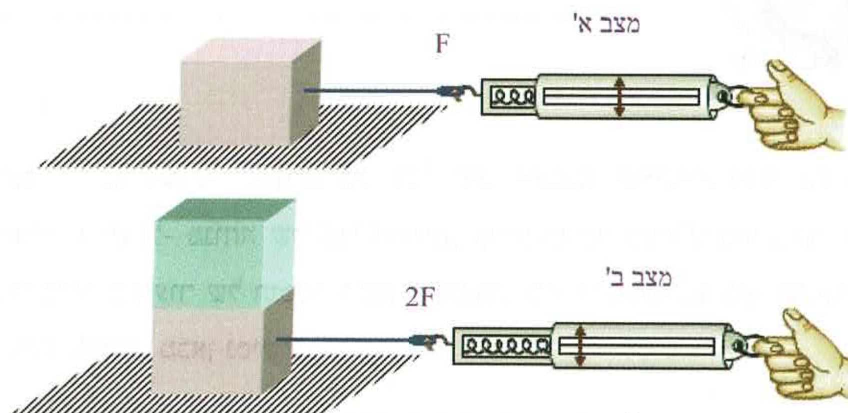
עתה נוכל לסכם:

1. כוח החיכוך הסטטי מונע היווצרות תנועה יחסית בין שני גופים.
2. כוח החיכוך הסטטי יכול לגרום לתנועה ולא רק להתנגד לה.

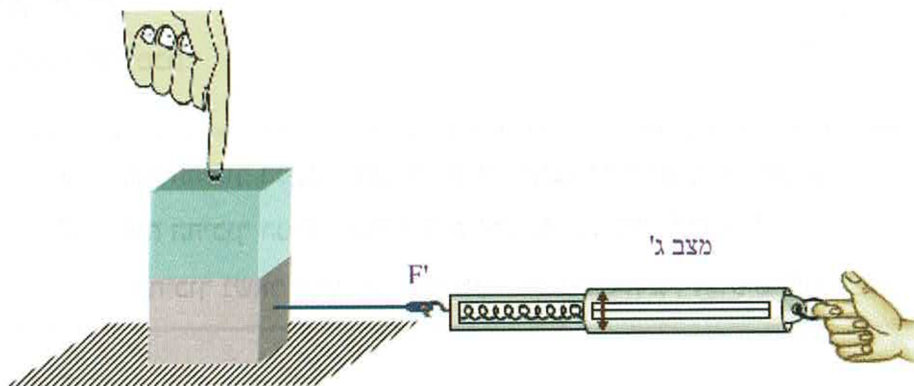
החיכוך נשאר סטטי כול עוד אין תנועה יחסית בין הגופים הצמודים.

הדגמה מס' 3

נניח בול עץ על שולחן, ובעזרת מד כוח נמצא את הכוח, הנדרש להביא את הבול לסף תנועה **(מצב א')**. לאחר מכן נניח בול עץ נוסף, זהה לו, ונבדוק, מהו הכוח, שיידרש הפעם להביא את הבול המצורף לסף תנועה **(מצב ב')**. נקבל, שהכוח הנדרש במצב ב' כפול מזה שנדרש במצב א'.



אם באותו ניסוי נפעיל כוח נוסף על ידי לחיצת אצבע **(מצב ג')**, נראה שהכוח הנדרש להביא את בולי העץ לסף התנועה גדול עוד יותר.



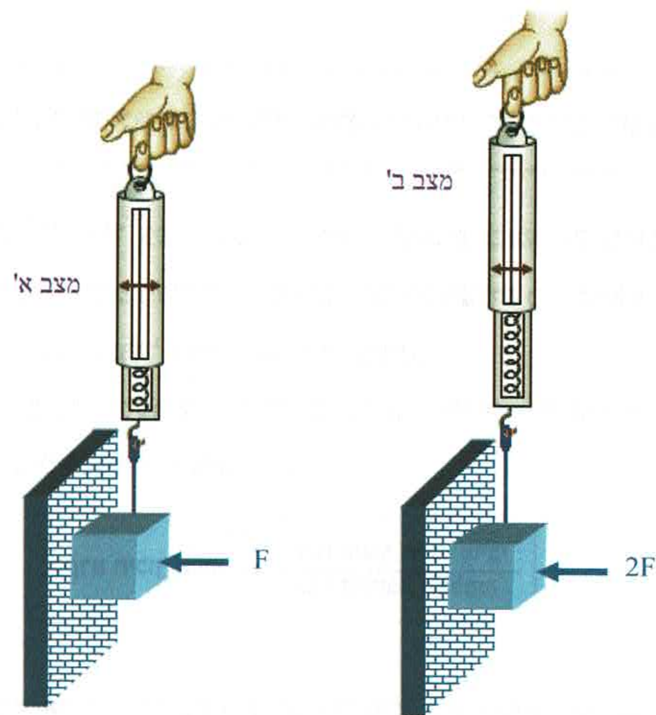


הניסויים מראים על קיום השפעה של כוח **אנכי** למגע בין הגופים **על גודל כוח החיכוך הסטטי.**
כוח אנכי למגע בין גופים הוא **כוח התגובה האלסטית (הכוח הנורמלי).**

כאשר היו מונחים על השולחן שני בולי עץ, התגובה האלסטית במגע עם המשטח הייתה **שווה** למשקל- מנוחה של שני הגופים, אולם כאשר הפעלנו כוח נוסף, התגובה האלסטית גדלה בשיעור של תוספת הכוח שהופעל, ולכן גדל כוח החיכוך הסטטי המרבי לעומת ערכו הקודם. מכאן נסיק ש:

גודל כוח החיכוך הסטטי המרבי
נמצא ביחס ישר לכוח התגובה האלסטית.

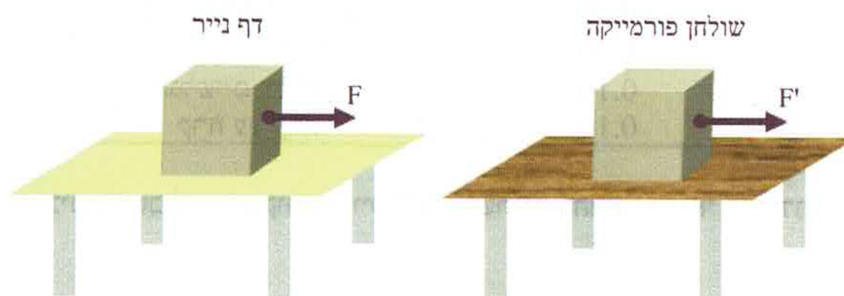
כדי להראות שכוח החיכוך הסטטי המרבי תלוי בכוח התגובה האלסטית של המשטח, ולא בהכרח במשקל הגופים, נצמיד שני גופי עץ זהים לקיר (עיין בסרטוט) ונפעיל כוחות אופקיים שונים.



ננסה למצוא עבור כל אחד מגופי העץ את הכוח המרבי, הדרוש להביא אותו לסף התנועה. נקבל כוחות שונים בערכם. זאת למרות שגופי העץ היו זהים (במצב ב' נדרש כוח גדול יותר). פירוש הדבר: הגורם הקובע את גודל החיכוך הסטטי הוא כוח התגובה האלסטית, השווה לכוח האופקי שהפעלנו.

הדגמה מס' 4

נניח בול עץ על שולחן פורמייקה. אחר כך נדביק דף נייר על השולחן, ונניח את בול העץ על הדף (כמתואר בסרטוט). בעזרת מד כוח נמצא, מהו הכוח הנדרש להביא את בול העץ למצב של סף תנועה בכל אחד מהמצבים. נקבל, שעבור כל אחד משני המצבים נדרש כוח שונה. הסיבה לכך היא **טיב המשטחים** עליהם מונח בול העץ בכל פעם.



מסקנה:

גודלו של כוח החיכוך הסטטי תלוי בטיב משטחי הגופים המצויים במגע.

את התלות של החיכוך בטיב משטחי המגע מבטאים באמצעות מקדם חיכוך סטטי שנסמנו μ_s. ניסויים מדויקים מעידים, שבתחום רחב של מצבים מקדם זה אינו תלוי במידת הליטוש, בטמפרטורה או בגודל שטח המגע בין הגופים.

הניסוי מעיד גם על הקשר הישר הקיים בין כוח החיכוך הסטטי המרבי לבין כוח התגובה האלסטי, כלומר, ניתן לרשום:

$$\text{מקדם חיכוך סטטי} = \frac{\text{כוח חיכוך סטטי מרבי}}{\text{כוח התגובה האלסטי}}$$

קשר זה מאפיין את החיכוך בין חומרים מסוימים, ללא תלות בצורתם או בגודלם של הגופים שבמגע.

אם נסמן את כוח החיכוך הסטטי המרבי – fs_{max} (יחידותיו ניוטון) ואת כוח התגובה האלסטית – N (יחידותיו ניוטון), נקבל ביטוי מתמטי עבור הקשר ביניהם:

$$\frac{f_s(max)}{N} = \mu_s$$

מצורת הקשר נובע, שמקדם החיכוך הסטטי הוא גודל חסר מימד (מספר טהור).

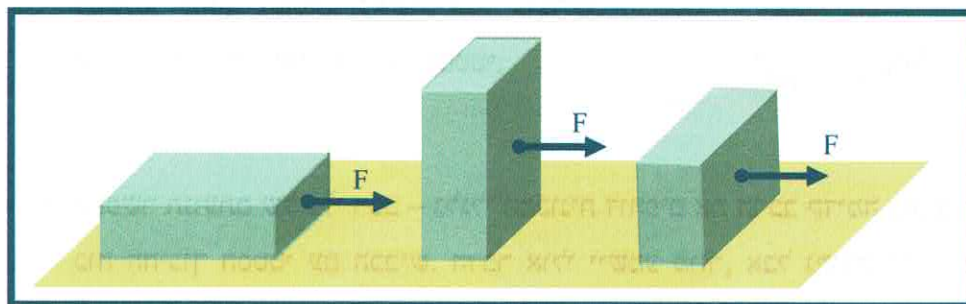
בטבלה נציין מספר דוגמאות עבור מקדמי חיכוך סטטי בין חומרים שונים, שהתקבלו באופן ניסיוני.

החומרים	μ_s
פלדה על פלדה	0.75
פלדה על נחושת	0.50
פלדה על אלומיניום	0.60
צמיג על כביש	1.00
מגלשיים על שלג	0.10
קרח על קרח	0.10

הערה: הערכים שבטבלה הם מקורבים ויכולים להשתנות בהתאם לתנאי המדידה.

הדגמה מס' 5

ניקח תיבת עץ ונניח אותה על שולחן, בכל פעם על פאה אחרת. נבדוק בעזרת מד כוח, עבור כל מצב, מהו הכוח המרבי, הנדרש להביא את התיבה לידי סף תנועה. נקבל, שעבור שלושת המצבים נדרש להפעיל את אותו גודל כוח.



ניסויים מדויקים יותר הראו, שבקירוב טוב ניתן לחשוב, שהחיכוך הסטטי המרבי אינו תלוי בשטח המגע בין המשטחים המתחככים. כלומר:

כוח החיכוך הסטטי אינו תלוי בשטח המגע בין הגופים.

הערה: אנו מדברים על חיכוך בין גופים מוצקים ולא על נוזלים וגזים, או חומרים מדבקים כגון סקוטש.

התועלת והנזק שבחיכוך הסטטי

לעיתים קרובות נשאלת השאלה, **האם חיכוך מועיל או מזיק?** כמו במקרים רבים בחיים, התשובה אינה חד- משמעית. ננסה למנות מספר השלכות לקיום החיכוך הסטטי וניתן להן הערכה: "טוב" ו"רע", אבל, כמובן, אין להערכה זו משמעות מוחלטת, וההתייחסות שלנו יכולה להשתנות בהתאם לנסיבות.

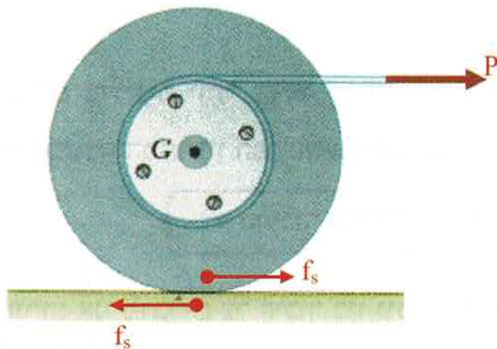
החיכוך הסטטי מועיל כי הוא:

✓ מאפשר הליכה – כאשר אנו מתחילים ללכת, הרגל דוחפת לאחור, ובמגע שלה עם הרצפה פועל (על הרצפה) כוח אופקי **אחורה.** בהתאם לחוקי הכוח, הרצפה מפעילה על הרגל כוח אופקי קדימה.

✓ בשעה שקיים מגע בין הרגל לרצפה, הרגל נשארת צמודה לרצפה, ולכן החיכוך הוא סטטי. קל להבין זאת, אם ננסה לדמיין, מה יקרה, כאשר נלך על משטח חלק במיוחד (קרח, למשל). בזמן האטה, כאשר אנו עוצרים, מתחלפים כיווני כוחות החיכוך הסטטי.



✓ מאפשר תנועתם של כלי רכב – גלגלי המכונית דוחפים את הרכב קדימה באמצעות כוח החיכוך הסטטי עם הכביש. הדבר אולי יישמע מוזר, אבל נקודת המגע של הגלגל עם הכביש נמצאת במנוחה (כמו הכביש עצמו). ניתן להגיד, שבאותו רגע הגלגל כולו נע סביב נקודת המגע עם הכביש.



✓ כוח החיכוך הסטטי פועל על הגלגלים בכיוון תנועתם – כאשר הרכב מתקדם; ולאחור – כאשר הרכב מאט.

✓ שימו לב! ללא החיכוך הסטטי בנקודת המגע – הרכב לא היה יכול להתקדם כלל, ולא היה עוזר שום מאמץ של המנוע.

✓ מאפשר הצמדת גופים – התפקוד של נעצים, מסמרים וסיכות מתאפשר הודות לחיכוך הסטטי עם המשטח, אליו נצמד הגוף.

✓ מאפשר גלגול הגופים זה על זה אחד ללא החלקה,

✓ מאפשר קשירת קשרים בחבל, רכיסת רוכסן, מעבר תנועה בתיבת הילוכים.

החיכוך הסטטי יכול לגורם לבעיה:

✓ גופים זרים נצמדים בתוך צינורות וסותמים אותם (כולל כלי דם בגוף האדם)

✓ חפצים מתכסים באבק.

✓ בוץ מצטבר על הכבישים לסתימות ביוב.

הערה: ניתן להקטין את החיכוך הסטטי בעזרת סיכה וליטוש, וכך להוריד את מידת הנזק.

סיכום בנושא החיכוך הסטטי

1. כוח החיכוך הסטטי יכול להופיע גם אם הגוף נמצא במנוחה וגם אם הוא נימצא בתנועה ביחס לארץ. הפרט ההכרחי לקיום חיכוך סטטי הוא היעדרות תנועה יחסית בין הגופים, הנמצאים במגע.
2. כוח החיכוך הסטטי משתנה בגודלו מאפס ועד לערך מקסימאלי מסוים, כאשר הגוף נמצא על סף תנועה.
3. כוח החיכוך הסטטי פועל נגד היווצרות תנועה יחסית בין המשטחים שבמגע, ומכוון נגד תנועה אפשרית בהתאם.
4. גודלו המקסימאלי של כוח החיכוך הסטטי נמצא ביחס ישר לגודל התגובה האלסטית של משטח המגע. מכאן הביטוי: $\frac{f_s(max)}{N} = \mu_s$. גודל זה תלוי בטיב החומרים הבאים במגע.
5. במידה רבה של דיוק ניתן לטעון, שכוח החיכוך הסטטי אינו תלוי בשטח המגע.

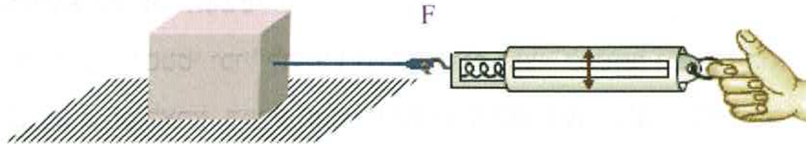
חיכוך קינטי

החיכוך הקינטי פועל בין שני גופים, כאשר הם נעים אחד יחסית לשני. במקרה זה לחיכוך מספר תכונות זהות לאלו של החיכוך הסטטי, ולכן לא נזכיר את כל ההדגמות שערכנו לגבי חיכוך הסטטי, אלא רק אחת, שתבליט את ההבדלים בין שני סוגי החיכוך. על התכונות המשותפות נדבר בהמשך.

הדגמה מס' 6

נניח בול עץ על שולחן ונמשוך אותו ימינה בעזרת מד כוח כמתואר בסרטוט. תחילה, כאשר הכוח המושך קטן, הבול לא ינוע הודות לחיכוך הסטטי. בהמשך הגדלת המשיכה נגיע למצב של סף תנועה, כאשר החיכוך הסטטי הוא מרבי.

אם נגדיל את המשיכה עוד יותר, הבול יחל לנוע. מתברר שבמצב זה, הכוח, אותו נצטרך להפעיל כדי להניע את הבול בקצב קבוע, קטן מהכוח, הנדרש מאיתנו במצב של סף תנועה. נשים גם לב שכוח המשיכה בזמן גרירה בקצב קבוע, אינו משנה את ערכו. איתו לא משתנה גם כוח החיכוך, שבמקרה זה מכונה **כוח חיכוך קינטי**.



מהדגמה זו אפשר להסיק מספר מסקנות:

1. כוח החיכוך הקינטי קטן יותר מכוח החיכוך הסטטי המרבי.
2. כוח החיכוך הקינטי פועל בניגוד לכיוון התנועה היחסית בין הגופים, ומקטין את המהירות היחסית ביניהם.
3. כוח החיכוך הקינטי אינו משנה את גודלו במהירויות שונות.

תכונות נוספות של החיכוך הקינטי

מהדגמות דומות לאלו שערכנו (הדגמות מס' 3, 4 ו- 5), ניתן להגיע למסקנות חשובות לגבי החיכוך הקינטי:

1. גודל כוח החיכוך הקינטי נמצא ביחס ישר לגודל כוח התגובה האלסטית (הכוח הנורמלי).
2. גודל כוח החיכוך הקינטי תלוי בטיב המשטחים, הנמצאים במגע.
3. גודל כוח החיכוך הקינטי אינו תלוי בגודל שטח המגע שבין הגופים שבתנועה יחסית.

ניתן לבטא את התלות הישרה של כוח חיכוך קינטי בכוח הנורמלי באמצעות נוסחה מתמטית: $\frac{f_k}{N} = \mu_k$ או: $\boxed{f_k = N \cdot \mu_k}$

כאשר הסימונים הם:

f_k – כוח החיכוך הקינטי (ביחידות ניוטון)

N – כוח התגובה האלסטית (ביחידות ניוטון)

μ_k – מקדם החיכוך הקינטי (חסר מימד)

מקדם החיכוך הקינטי מאפיין באופן כמותי את החיכוך הקינטי בין חומרים מסוימים וכאמור, אינו תלוי במהירות היחסית בין הגופים המתחככים.

התועלת והנזק שבחיכוך הקינטי

החיכוך הקינטי **מועיל** ב:

- ✓ הצתת גפרורים – במעבר הגפרור על פני הקופסה החיכוך הקינטי ביניהם מצית את התגובה הכימית, אשר גורמת לבעירה של גוף הגפרור.



- ✓ נגינה בכלי קשת – במעבר הקשת מעל מיתרי כלי הנגינה, החיכוך הקינטי הגבוה ביניהם גורם לרעידת המיתרים, אשר גורמת ליצירת צלילי קול.



- ✓ ליטוש חפצים – יהלום גולמי, המצוי בטבע, אינו מבריק ואינו שקוף. רק לאחר ליטוש בעקבות חיכוך קינטי גבוה, מקבל היהלום את הצורה המוכרת לצרכנים. רק לאחר הליטוש נעשה היהלום מבריק ושקוף לאור.



החיכוך הקינטי **מהווה בעיה**, כי חיכוך זה:

- ✓ גורם ל**שחיקה ולהתחממות** של חלקים במכונות.
- ✓ גורם ל**האטה**, להקטנה מתמדת של מהירות התנועה היחסית בין הגופים הנמצאים במגע ביניהם.
- ✓ גורם ל**צורך בכוח** על מנת לקיים תנועה של גופים. ללא חיכוך הגופים היו ממשיכים לנוע בהתמדה בדומה לכוכבי הלכת סביב השמש.



ניתן להקטין את החיכוך הקינטי בין הגופים, למשל בעזרת סיכה (שימון) או ביטול המגע בין הגופים ("כרית אוויר") .



1) כוח החיכוך פועל תמיד:

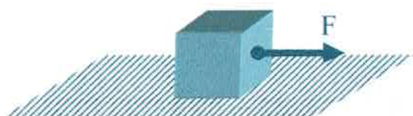
א. בכיוון תנועת הגוף.

ב. נגד כיוון תנועת הגוף.

ג. במאונך לכיוון תנועת הגוף.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

2) גוף מונח על משטח אופקי. מפעילים עליו כוח אופקי, F, אבל הגוף נשאר במקומו. במצב זה:



א. כוח החיכוך הסטטי שווה לכוח F.

ב. כוח החיכוך הסטטי גדול מהכוח F.

ג. כוח החיכוך הסטטי קטן מהכוח F.

ד. לא ניתן לדעת את גודלו של כוח החיכוך הסטטי.

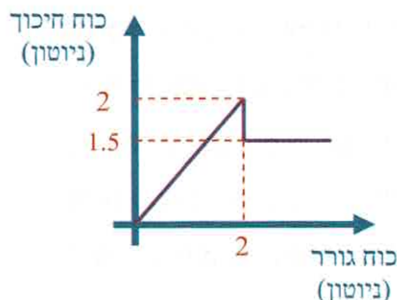
3) כאשר גוף נע על פני משטח לא חלק, כוח החיכוך הקינטי:

א. גדל בזמן התנועה.

ב. קטן בזמן התנועה.

ג. אינו משתנה בזמן התנועה.

ד. לא ניתן לדעת אם הוא משתנה בזמן התנועה.



4) הגרף הבא מתאר את התלות של כוח החיכוך, הפועל על גוף מסוים, בגודל הכוח הגורר את הגוף. האם נכון ש:

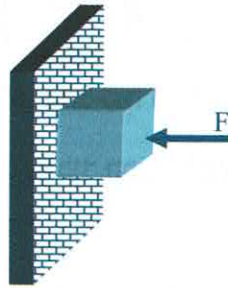
א. עד כוח של 2 ניוטון הגוף היה במנוחה?

ב. גודלו של כוח החיכוך הסטטי המרבי הוא 2 ניוטון?

ג. כוח החיכוך הקינטי שווה ל- 1.5 ניוטון?

ד. כל התשובות נכונות?

5) גוף מוצמד לקיר על ידי כוח F ונמצא במנוחה. במצב זה, כוח החיכוך הסטטי הפועל על הגוף:



א. תלוי במשקלו של הגוף.

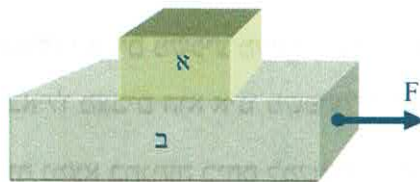
ב. פועל בכיוון מטה.

ג. תלוי בגודלו של הכוח F_1.

ד. כל התשובות נכונות.

6) בול עץ א' מונח על בול עץ ב', ושניהם נגררים ימינה על ידי כוח F, הפועל על הגוף התחתון. אם ידוע שאין תנועה יחסית בין הגופים, הדבר מחייב ש:

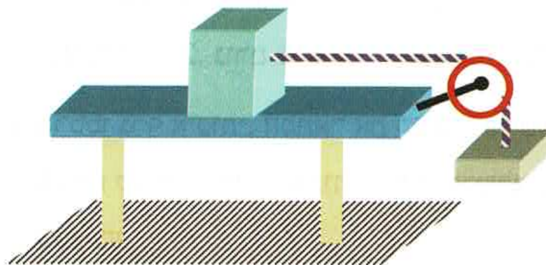
א. כוח החיכוך הסטטי בין הגופים פועל על גוף א' בכיוון ימין.



ב. כוח החיכוך הסטטי בין הגופים פועל על גוף ב' בכיוון שמאל.

ג. גודל כוח החיכוך הסטטי, הפועל על כל אחד מהגופים, זהה.

ד. כל התשובות נכונות.



7) המערכת הבאה נמצאת במנוחה.

הדבר מחייב ש:

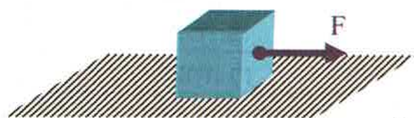
א. כוח הכובד הפועל על שני הגופים יהיה זהה.

ב. השולחן חייב להיות חלק.

ג. כוח החיכוך שווה למתיחות האלסטית של הגוף.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

8) כוח מסוים גורר גוף ימינה. אם ידוע, שהגוף אינו משנה את תנועתו בזמן הגרירה (נע במהירות קבועה), ניתן להסיק ש:



א. הרצפה חלקה.

ב. כוח חיכוך פועל בכיוון המנוגד לכיוון תנועת הגוף.

ג. הכוח נשאר קבוע במשך כל זמן הגרירה.

ד. כל התשובות אינן נכונות.



חיכוך

1. הביאו דוגמאות למקרים, בהם כוח החיכוך הסטטי פועל בכיוון תנועת הגוף.

2. באילו גדלים תלוי כוח החיכוך הסטטי? באילו גדלים שהוזכרו בפרק **אין** כוח החיכוך (הסטטי או הקינטי) תלוי?

3. מה מונע כוח החיכוך הסטטי, ומה מונע כוח החיכוך הקינטי?

4. מהו ערכו המרבי של כוח החיכוך הסטטי? למה שווה גודלו של כוח החיכוך הסטטי, כאשר מופעל על הגוף כוח F במקביל למשטח המגע בין הגופים, הקטן מערכו של כוח החיכוך הסטטי המרבי?

5. באילו מצבים משפיע משקלם של גופים על גודלו של כוח החיכוך (הסטטי או הקינטי), ובאילו מצבים הוא אינו משפיע? הביאו דוגמאות.

6. גוף נמצא בתנועה ביחס למשטח, עליו הוא מונח. כאשר הגוף יגביר את מהירותו, האם גודלו של כוח החיכוך הקינטי יגדל? נמקו!

7. הביאו שתי דוגמאות, שלא הוזכרו בפרק, למקרים שבהם כוח החיכוך הסטטי:
1. מועיל. 2. גורם לבעיה. ענו על הסעיף הנ"ל גם עבור כוח החיכוך הקינטי.

8. סרטטו גרף איכותי, המתאר את התלות של כוח החיכוך הפועל על גוף, הנמצא על משטח לא חלק, בגודל הכוח הגורר, מהשלב, בו הכוח התחיל לפעול עד לשלב שבו הגוף נע.

9. כיצד ניתן להקטין את גודלו של כוח החיכוך: א. הסטטי? ב. הקינטי?

10. השלימו את הטבלה הבאה:

	חיכוך סטטי	חיכוך קינטי
פועל ל:		
תלוי ב:		
שווה ל:		
אינו תלוי ב:		
ניתן להקטינו ע"י:		
מצבים בהם הוא מועיל:		



שאלות חישוב

1. גוף שמסתו 4 ק"ג מונח על משטח אופקי. מהו הכוח המינימאלי שיגרום לתזוזת הגוף, אם מקדם החיכוך הסטטי בין הגוף והמשטח הוא 0.5?

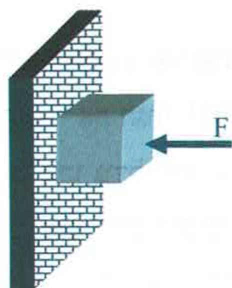
2. גוף שמסתו 5 ק"ג נמצא על משטח אופקי. אם מקדם החיכוך הסטטי בין הגוף והמשטח הוא 0.6, ומקדם החיכוך הקינטי הוא 0.3, מהו כוח החיכוך הפועל על הגוף, כאשר הכוח המושך אותו הוא אופקי וגודלו:



(1) 0N (2) 10N (3) 20N (4) 30N (5) 40N

3. מה גודלו של כוח החיכוך הקינטי שפועל על גוף שמסתו 0.5 ק"ג, הנע על משטח אופקי, אם מקדם החיכוך הקינטי בין הגוף והמשטח הוא 0.1?

4. כוח אופקי של 50N דוחף גוף שמסתו 4 ק"ג כנגד קיר אנכי. מקדם החיכוך הסטטי בין הגוף והקיר הוא 0.6, ומקדם החיכוך הקינטי הוא 0.2. הגוף נמצא בתחילה במנוחה.



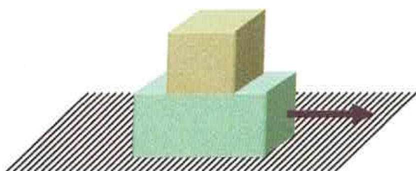
א. שרטטו את הכוחות הפועלים על הגוף.

ב. חשבו את גודלו של הכוח הנורמלי הפועל על הגוף.

ג. הוכיחו, שהגוף יתחיל לזוז כלפי מטה.

ד. מה צריך היה להיות ערכו של הכוח האופקי בכדי שהגוף יהיה על סף תנועה?

5. שני גופים מונחים זה על גבי זה. מסתו של הגוף העליון היא 3 ק"ג, ומסת הגוף התחתון היא 6 ק"ג. מקדם החיכוך הסטטי בין הגוף התחתון והמשטח הוא 0.6. בין הגופים אין חיכוך.



א. מהו הכוח האופקי המינימאלי, שיש להפעיל על הגוף התחתון, שיגרום לו לתנועה?

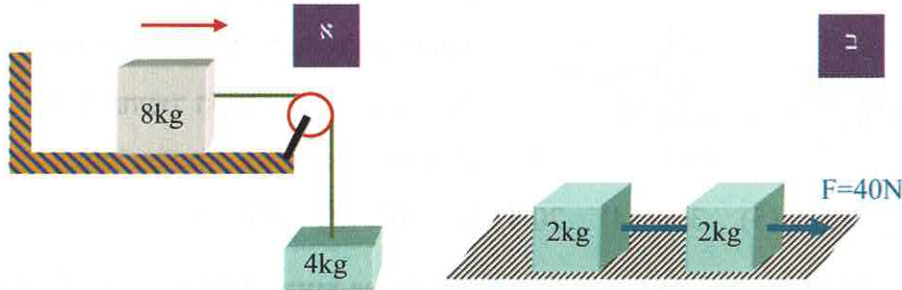
ב. האם הגוף העליון ינוע במקרה זה?

ג. מפעילים כוח גדול פי 2 מן הכוח, שמצאת בסעיף א'. נתון, שמקדם החיכוך הקינטי הוא 0.1. מה גודלו של כוח החיכוך הקינטי בין הגוף התחתון והמשטח?

6. לפניך שני מצבים בהם מערכת נעה במהירות קבועה.

א. מהו מקדם החיכוך הקינטי בין הגוף והמשטח בכל אחד מהמקרים?

ב. מהי המתיחות בחוט המקשר בין הגופים בכל אחד מהמקרים?

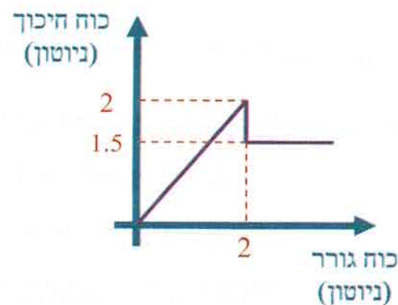


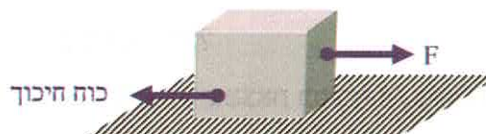
7. הגרף הבא מתאר את התלות של כוח החיכוך f, הפועל על גוף מסוים, בגודל הכוח, הגורר את הגוף F. הכוח אופקי ופועל על גוף, המונח על משטח אופקי.

א. מהו גודלו של כוח החיכוך הסטטי המרבי?

ב. מהו גודלו של כוח החיכוך הקינטי?

ג. אם מסתו של הגוף היא 2 ק"ג, מצא את מקדם החיכוך הסטטי ומקדם החיכוך הקינטי.

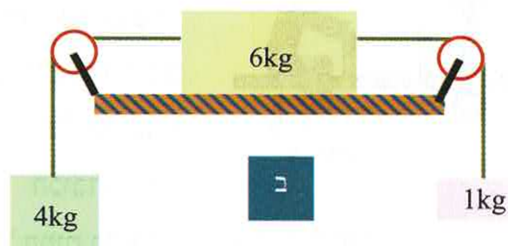




8. המערכות הבאות נמצאות במנוחה ועל סף תנועה.

מצאו את גודלו של מקדם החיכוך הסטטי.





תשובות

1. 20 [N] **2.** 1) 0 2) 10 [N] 3) 20 [N] 4) 30 [N] 5) 15 [N]

3. 0.5 [N] **4.** ב. 50 [N] ד. 66.66 [N]

5. א. 54 [N] ב. לא ג. 9 [N]

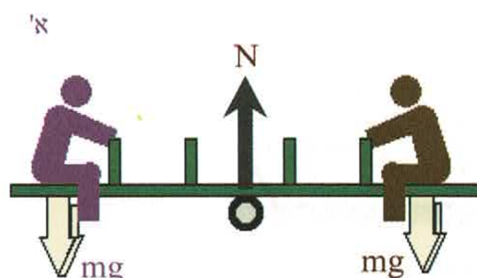
6. א. 0.5 , 1 ב. 40 [N] , 20 [N]

7. א. 2 [N] ב. 1.5 [N] ג. 0.1 , 0.075

8. 0.5 , 0.5

כאמור, חוקי ניוטון נוסחו עבור המקרים, בהם מימדי הגופים אינם חשובים, למשל, כאשר הגופים הם קטנים מאוד, או כאשר ניתן לחשוב שהם קטנים בהשוואה למרחק שביניהם. במקרים אלו ניתן להניח, שכל הכוחות פועלים בנקודה אחת, בה מצוי הגוף. על מנת לתאר את התנהגות הגוף, כאשר המצב אינו כזה, נדרש טיפול, שייקח בחשבון את העובדה, שהכוחות פועלים בנקודות שונות על אותו הגוף. הבנת מקרה זה תביא אותנו להסבר תופעות שונות בטבע ובטכנולוגיה, שפותחה על סמך ידע זה.

כדוגמה פשוטה למצב זה ניקח נדנדה. זהו מוט, הנתמך במרכזו ובקצותיו, יכולים לשבת שני אנשים. נשיב על הנדנדה שני נערים נניח שהם שווים מבחינת המסה. על כל אחד מהנערים פועל כוח הכובד, והם מפעילים את משקלם על המוט כל אחד mg (תרשים א').



כידוע, שני הנערים יכולים לגרום לנדנדה להישאר במנוחה. על סמך הנלמד, משמעות הדבר היא, שסכום כל הכוחות על המוט מתאפס. לפי החוק השני של ניוטון, במצב זה התאוצה מתאפסת, והנדנדה יכולה להישאר במנוחה. מכאן נסיק, שבנוסף לשני כוחות המשקל פועל על המוט כוח N מצד התמיכה, והוא זה, שיחד עם שני כוחות ה- mg , גורם לכוח השקול להתאפס:

$$N + mg + mg = 0$$

ברור ששוויון זה אפשרי רק בתנאי, שמדובר בגדלים, שבסיכומם צריך להתחשב בכיוון. שני כוחות ה- mg מכוונים כלפי מטה, ולכן הכוח N, מצד ציר הסיבוב, מפעיל כוח כלפי מעלה. בהתחשבות עם כיוון הפעולה יש לרשום:

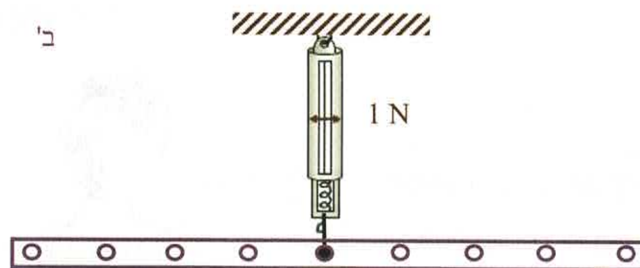
$$N - mg - mg = 0$$

עם זאת, איזון הנדנדה יישבר, אם אחד הנערים יישב קרוב יותר או רחוק יותר על המוט. הניסיון מעיד , שרק אם הנערים יישבו במרחקים שווים מהציר, יישמר האיזון והנדנדה לא תזוז.

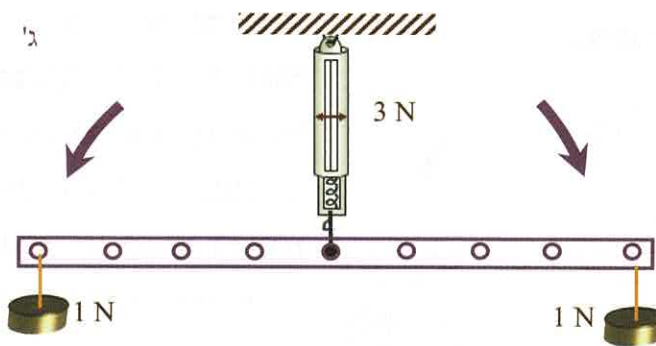
האם רק כאשר המרחקים שווים והמסות שוות חוקי ניוטון קבילים? התשובה היא שלילית: חוקי ניוטון קבילים עבור כל המקרים, אך במקרה של גוף כמו מוט, בו הכוחות פועלים עליו במקומות שונים, החוקים בצורה שלמדנו אינם מספיקים לתיאור מלא של תנועה הגופים.

נלמד עתה את הנושא בדיוק.

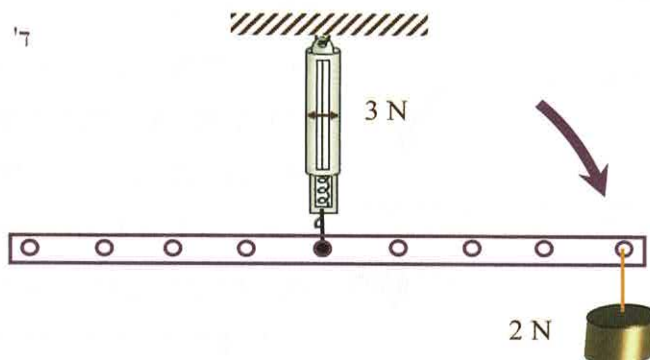
לשם כך ניקח סרגל, המחולק ליחידות אורך שוות, עליהן ניתן לתלות משקולות, ונתלה אותו ממרכזו לוו התחתון של מד כוח (תרשים ב'). מד הכוח יראה את משקלו של הסרגל 1N.



נתלה משקולות שוות של 1N בשני החורים הקיצוניים של הסרגל. הסרגל יישאר במנוחה. זהו מצב איזון בדיוק כמו בנדנדה, בה התחלנו את הדיון. מד הכוח יראה כמובן, 3N (תרשים ג').



עתה, במקום, שתי המשקולות נתלה משקולת אחת בקצה הימני של הסרגל אשר גודלה הוא 2N (תרשים ד').



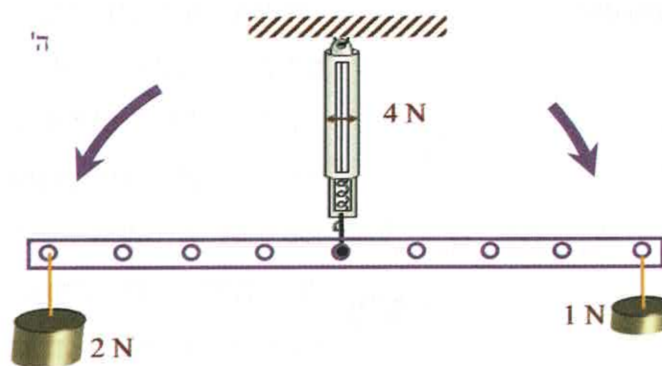
על פני הדברים, נשאר הכוח השקול, שפועל על המוט, כפי שהיה, אך האיזון של המוט יופר, והוא יסתובב במהירה.

נבין את הדרישה לאיזון אם נשווה את מצב ג' עם מצב ד'. בנוסף לכוח המשיכה כלפי מטה, כול משקולת יוצרת נטייה לסובב את המוט. נראה, שנטיות הסיבוב של המשקולות במצב של תרשים ג' (הן סומנו על ידי חצים מעוגלים) מבטלות זו עת זו, ולא כך קורה בתרשים ד'.

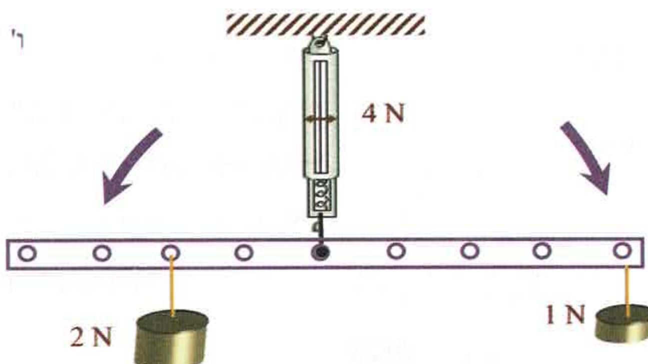


התאפסות הכוח השקול, המופעל על גוף, אינה מספיקה כדי לקבוע את מצב האיזון שלו.

נלמד יותר על נטיית הסיבוב. לשם כך נתלה משקולות שאינן שוות- של 2N ו- 1N, אך במרחקים שווים מן המרכז (תרשים ה'). לא נשיג איזון, והמוט יסתובב לכיוון המשקולת הכבדה יותר.



עתה נזיז את משקולת ה- 2N, כך שמרחקה עד הציר יהיה חצי מן המרחק של משקולת של 1N עד הציר (תרשים ו'). המוט יישאר במצב מנוחה ללא סיבוב. מד הכוח יראה 4 N.



על סמך ניסיון זה קל להגיע לכלל, המבטיח את איזונו של מוט, בו תלויות משקולות שונות:



איזון המוט מתרחש, כאשר יחס המשקלות התלויות, עליו, שווה ליחס ההפוך של המרחקים עד לנקודת התלייה של המוט.

אם נסמן את משקלי שתי המשקולות ב-W_1 ו- W_2 ואת המרחקים שלהם עד הציר ב-L_1 ו- L_2, נוכל לרשום את הכלל באופן הבא:

$$\frac{W_1}{W_2}=\frac{L_2}{L_1} \qquad (1)$$

או בצורה שקולה:

$$W_1 \cdot L_1 = W_2 \cdot L_2 \qquad (2)$$

כלל זה היה ידוע לאנשים כבר לפני אלפי שנים ובמקומות שונים בעולם. על סמך כלל זה בנו האנשים את המכשיר החשוב בחיי היום- יום בכל חברה – **המאזניים**. המאזניים (גם המילה באה מהמושג של איזון) מאפשרים לאדם לבצע את המדידה החשובה בחייו – **השקילה**.

אם מתוך הכלל נבודד משקל אחד נקבל:

$$W = W_{St} \cdot \frac{L_{St}}{L} \qquad (3)$$



כך בעזרת תוצאת השקילה על ידי מאזני תלייה, נוכל לדעת את המשקל הלא ידוע, W, בהשוואה למשקל ידוע, תקני (סטנדרטי) W_{St} ובמרחקי תלייה ידועים. אלה הם המאזניים הראשונים בהיסטוריה של האנושות.

הפיזיקה מנסה לדייק בביטויים היום-יומיים. כך למשל, במקום להגיד "גוף כבד", אנו שוקלים אותו וקובעים את משקלו. הניסויים שתיארנו מאפשרים לדייק בביטוי "הנטייה לסיבוב". נסמן אותה באות τ. זוהי האות הראשונה במילה torque – מאמץ סיבובי (השתמשנו באות יוונית כי האות t תפוסה לסימון של הזמן).

קיבלנו עדות, שהנטייה לסיבוב גדלה עם הגדלת המשקלות, התלויות על המוט, כאשר המרחק בין נקודת ההפעלה של הכוח לבין מרכז הסיבוב האפשרי נשמר. כלומר, קיבלנו:

$$\tau \propto W \qquad \text{(L- const)}$$

בנוסף, קיבלנו, שהנטייה לסיבוב גדלה עם הגדלת המרחק בין נקודת הפעלת הכוח (המשקל של המשקולת) עד למרכז הסיבוב האפשרי. נטייה זו מתאפסת כאשר הכוח מופעל על ציר הסיבוב ממש (נסו למשל פתיחת דלת בהפעלת לחץ על הציר של הדלת). כלומר, קיבלנו:

$$\tau \propto L \qquad \text{(W- const)}$$

ניתן לחבר את שתי התוצאות ולטעון שהנטייה לסיבוב של כוח מסוים היא מתכונתית לשני הגורמים הנ"ל:

$$\tau \propto W \cdot L \qquad (4)$$

על סמך תוצאה זו מגדירים בפיזיקה את גודל מייצג הנטייה לסיבוב של הגוף, הנגרמת על ידי כוח כלשהו F, המופעל על הגוף במרחק L מציר הסיבוב האפשרי כ**מומנט הכוח** τ:

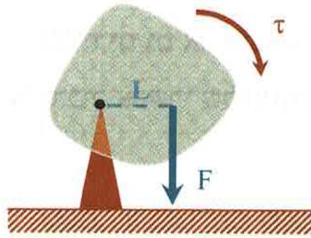
$$\boxed{\tau = F \cdot L} \qquad (5)$$

מומנט הכוח מבטא את מידת הנטייה לסיבוב הנגרם על ידי כוח הפועל במרחק מסוים מציר סיבוב אפשרי של הגוף



מהגדרת המומנט נובעות היחידות בהן הוא נמדד:

$$[\tau] = N \cdot m \qquad (6)$$



אם נמשיך לחקור את המושג מומנט, נגלה, שהגדרה (5) אינה מספקת במקרים אחדים. למשל, גלגל הנתמך במרכזו O (תרשים). להפעלה של כוחות השווים גם בגודלם וגם בכיוונם, הפועלים באותו המרחק מן המרכז, תהיה תוצאה שונה מבחינת הנטייה לסיבוב של הגלגל. כך לכוח F_1 יהיה מומנט:

$$\tau_1 = F_1 \cdot L$$

לעומת זאת, לכוח F_2 לא תהיה שום השפעה על סיבוב הגלגל. כוח זה מכוון ישירות אל המרכז.

ניתן לראות, שבעצם, רק לכוח המאונך לרדיוס תהיה השפעה על הסיבוב. לכן במקרה הכללי, כגון הכוח F_3, יש להתחשב רק באותו חלק של הכוח, אשר מכוון במאונך אל הרדיוס: הכוח $F_{3\perp}$. כלומר, יש להגדיר את מומנט הסיבוב של הכוח F_3 כשווה ל:

$$\tau_3 = F_{3\perp} \cdot L$$

הגענו להגדרה סופית של מומנט הכוח F, הפועל במרחק L מציר הסיבוב של הגוף:

$$\boxed{\tau = F_{\perp} \cdot L} \qquad (7)$$

ברור גם שלאפיון המומנט יש לציין את מגמת הסיבוב האפשרי, למשל, בהתאם לכיוון סיבוב השעון או כנגדו. אפיון זה הוא כמו ההבדל בין מספרים חיוביים לבין מספרים שליליים מבחינת החיבור ביניהם.

נשאר רק להגיד, שבמקרה, בו פועלים על הגוף מספר כוחות בדומה למושג הכוח השקול עבור הסכום של כול הכוחות:

$$F_R = F_1 + F_2 + F_3 + \cdots \qquad (8)$$

מגדירים גם את המומנט השקול של כל הכוחות, הפועלים על הגוף, ביחס לציר מסוים של סיבוב אפשרי של הגוף:

$$\tau_R = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \cdots \qquad (9)$$

בשלב זה ביכולתנו להגדיר את התנאי למצב מאוזן של גוף כלשהו. אם עבור האיזון של גוף קטן היינו צריכים, לפי החוק השני של ניוטון, לדרוש:

$$\boxed{F_R = 0} \qquad (10)$$

אזי עבור גוף בעל מימדים סופיים יש לדרוש בנוסף:

$$\boxed{\tau_R = 0} \qquad (11)$$

רק כאשר מתקיימות שתי הדרישות (10) ו- (11), ניתן לטעון, שגוף, שהיה במנוחה, יישאר במצב זה: ללא תנועה וללא סיבוב.



אם גוף מצוי במצב מנוחה, ניתן לטעון, שגם הכוח השקול מתאפס, וגם המומנט השקול יחסית לכל ציר סיבוב אפשרי מתאפס: $F_R = 0$ ו-$\tau_R = 0$

מצב האיזון של הכוחות והמומנטים נקרא לפעמים גם בשם "שיווי משקל", אך, במונח זה משתמשים עבור האיזון של גורמים שונים, ויש לדייק בשימוש במונח (כך, למשל, משתמשים בשיווי משקל בין גז לבין נוזל או בין יצירתם והשמדתם של חלקיקים ותוצרים בתגובה כימית כלשהי).

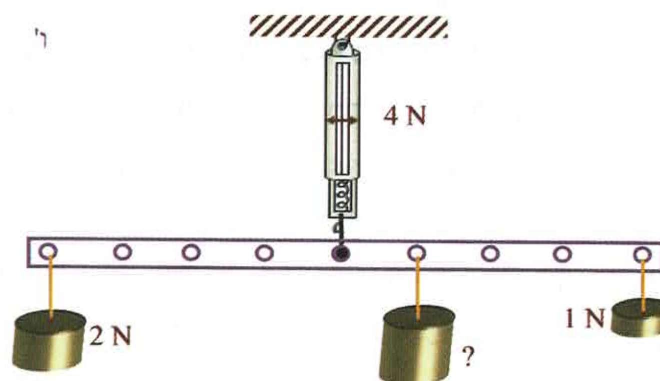
נסיים בהערה חשובה: במקרה של גוף קטן, כאשר הכוח השקול מתאפס, אין בכך הבטחה למצב נייח, אלא למצב בו אין תאוצה. בדומה התאפסות המומנט השקול אינו מבטיח, שלא יהיה סיבוב, אלא סיבוב בקצב אחיד. כלומר, הגלגל ימשיך להסתובב, גם אם המומנט השקול עליו יתאפס. רק אם נעצור אותו, הוא לא יסתובב יותר לאחר שנשחרר אותו. כך ממשיכים כוכבי לכת שונים להסתובב במערכת השמש, גם אם סכום כל הכוחות וכל המומנטים בתוכה שווה לאפס. לכן אנו מסתכלים על מערכת השמש כעל גוף אחד בעל מימדים, או, באופן יותר מדויק, כ**מערכת סגורה**.



מערכת סגורה של גופים ניתן לדמיין כגוף אחד,
הנטול כל השפעה חיצונית.
זהו המקרה בו, הכוח השקול ומומנט הכוח השקול על הגוף
מתאפסים.

בעיה לדוגמה

בתרשים מוצג סרגל, ובו תלויות משקולות שונות. הסרגל נמצא במצב מנוחה ובמקביל לקרקע. מהו הגודל של המשקולת הקרובה לציר הסיבוב האפשרי של הסרגל, אם ידוע שהמרווח בין כל שני חורים הוא 0.1m?



פתרון

כדי שהסרגל יישאר במנוחה, המומנטים של כל המשקולות חייבים להסתכם לאפס. יש להתחשב גם במגמת הסיבוב של כל מומנט.

במגמה של כיוון השעון פועלים המומנטים של המשקולת של 1N והמשקולת הלא ידועה. סכום המומנטים, בהתחשבות בגודל הזרועות הוא:

$$\tau_1 = W \cdot 0.1\text{ m} + 1\text{N} \cdot 0.4\text{ m}$$

ובמגמה של נגד כיוון השעון פועל המומנט של המשקולת של 2N. לכן המומנט של משקלה הוא:

$$\tau_2 = 2\text{N} \cdot 0.4\text{ m}$$

מומנטים אלו חייבים להיות שווים, על מנת שהסרגל יישאר במנוחה: $\tau_2 = \tau_1$ ולכן:

$$2\text{N} \cdot 0.4\text{ m} = W \cdot 0.1\text{ m} + 1\text{N} \cdot 0.4\text{ m}$$

מכאן: $W = 4\text{N}$

ההבנה, שהצגנו על איזון הכוחות והמומנטים, הושגה רק, אחרי שניוטון פיתח את התיאוריה של המכניקה. אין זה אומר שלאנשים לא היה כלל ידע ואף יכולת להשתמש בידע זה. היו גם תאוריות אחרות, פחות מוצלחות במתן הסברים לתופעות טבע, אך היו בעיקר כללים, שנקבעו על סמך ניסיון רב והרבה גילויים מעשיים, הברקות של אנשים רבים, במדינות שונות, לאורך של התרבויות השונות.

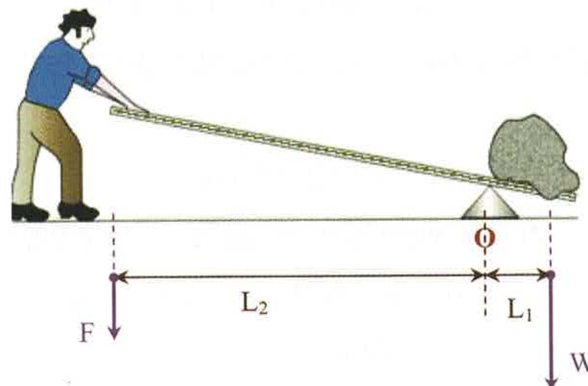
דוגמה חשובה לידע זה, שנולד לפני אלפי שנים ובמקומות שונים בעולם, היא מכונה פשוטה בשם מנוף. אחרי המחקרים של אריסטו, במאה ה- 4 לפני הספירה, ושל ארכימדס, במאה ה- 3 לפני הספירה, פותחו הסברים ונוסחו כללים, המסבירים את פעולת המנוף, באופן שאנו מזהים כשימוש במומנטים של כוחות.

כאמור, המנוף שייך לעתיק ביותר מבין המכונות הפשוטות. המנוף הוא מתקן, שהומצא על ידי האדם, במטרה להגביר את כוחו הפיזי הדל והלא מספק לצורך בניית מבנים גדולי מימדים ולצורך הפעלת מכשירים טכנולוגיים, להם היו זקוקים האנשים למטרות שונות של שלום ומלחמה. המנוף אכן אפשר לאדם להגביר את כוחו.

לא רק האדם המציא מנוף. הטבע גם הוא "משתמש" במנוף באופן רחב ביותר. כך בגוף האדם פועלים כ- 200 מנופים מסוגים שונים. כל השלד של האדם הוא בעצם מתקן מנופים.

המנוף בצורתו הפשוטה מהווה מוט בעל אפשרות להסתובב סביב נקודה קבועה. נקודה זו משמשת כציר המנוף.

התרשים הבא מתאר מנוף פשוט בפעולה: אדם מנסה להרים אבן כבדה.



האדם משתמש במוט פלדה ארוך ומניח אותו על התמיכה O, המשמשת כציר הסיבוב. האבן מונחת על המוט, קרוב יותר לתמיכה O. כלומר, האבן מפעילה על המוט את כוח המשקל W במרחק L_1 מן הציר. על הקצה השני, במרחק L_2, מפעיל האדם כוח F. האיזון אם כן יתרחש כאשר:

$$W \cdot L_1 = F \cdot L_2 \qquad (12)$$

מכאן, כמו שגם מן הביטוי (1), נובע, שמאחר ש: $L_2 >> L_1$ יהיה בדיוק באותה המידה F << W, וזאת המטרה של השימוש במנוף זה. תוספת כוח קטנה שיפעיל האדם מעל כוח F תגרום לאבן להתרומם לגובה.

את היחס בין הכוח, שהופעל על המנוף על ידי המשא (משקל שלו W), לבין הכוח, המופעל על ידי האדם על המנוף, מכנים במונח **היתרון המכאני** של המנוף, אותו נסמן ב-η. כלומר:

$$\eta = \frac{W}{F} \qquad (13)$$



מקדם היתרון המכאני מוגדר כך, שכאשר נצליח להזיז משא בעל משקל גדול מן הכוח שנפעיל, נקבל גודל, הגדול מאחד. כלומר η>1, המביע את הרווח בכוח שהושג במכונה.

על סמך הנלמד נוכל מיד להסיק על קיום היתרון המכאני על סמך היחס בין זרועות המנוף בלבד:

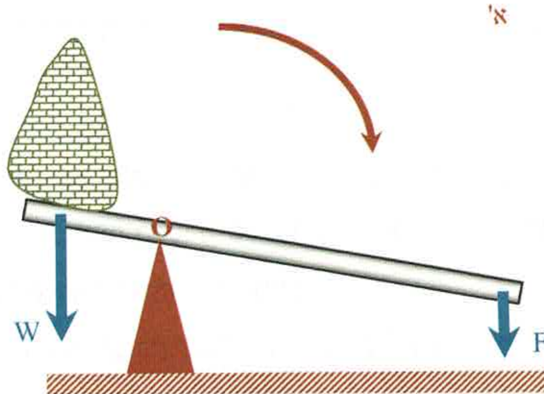
$$\eta = \frac{L_F}{L_W} \qquad (14)$$

כאשר L_F הוא הזרוע של הכוח, שהופעל על מנוף על ידי האדם, ו- L_W הוא הזרוע של המשא.

היתרון המכאני שווה ליחס בין זרועות המנוף

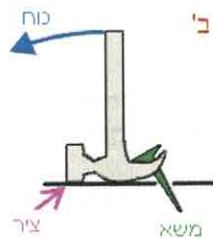
לאחר אלפי שנים של שימוש במנוף במקומות שונים ובתרבויות שונות, אפשר להבחין רק בין ארבעה סוגים של מנוף. נציג אותם:

מנוף מהסוג הראשון. במנוף מסוג זה נמצא ציר הסיבוב, או נקודת המשען, בין המשקל של המשא W, לבין הכוח של המפעיל F (תרשים א').

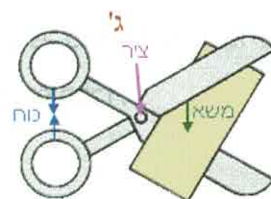


ברור מן הכלל שקיבלנו (14), שככל שזרוע המפעיל ארוכה יותר, קל לו יותר להרים, והיתרון המכאני עולה (המקדם η גדל).

מנוף זה ליווה את האנשים בבניית כל המבנים, המקדשים והארמונות הענקיים. מנוף זה שימש גם למטרות קטנות יותר, כגון: הוצאת מסמר מתוך בול עץ. כך גם הפטיש של המסגר פועל על עיקרון מנוף מהסוג הראשון (תרשים ב').

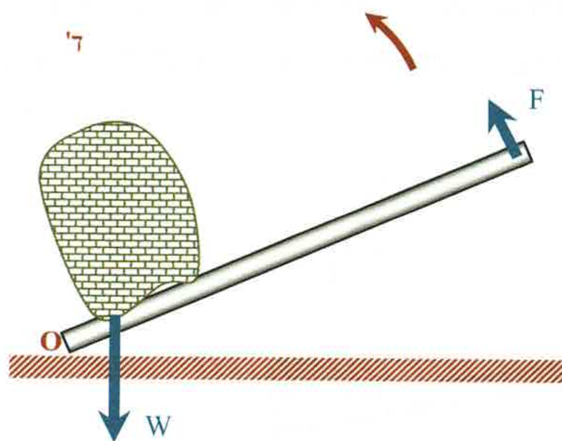


משילוב חכם של שני מנופים מסוג זה נקבל את המספריים, אחד המכשירים השימושיים ביותר בחיי היום יום (תרשים ג').

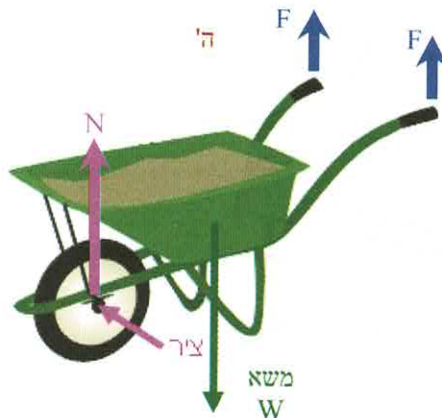


מפעילים כוחות בקצוות (בעלי טבעות עבור האצבעות) וסוגרים את המרחק בין הסכינים של המספריים. הכוח, שפועל על הגוף בין הסכינים, גדול בהרבה מהכוח, המופעל על ידי האצבעות.

מנוף מהסוג השני. במנוף זה שני הכוחות, הן המשקל של המשא W, והן הכוח של המפעיל F, פועלים באותו צד של ציר הסיבוב (נקודת התמיכה O). עתה שני הכוחות חייבים לפעול במגמות מנוגדות, כדי שהמומנטים יתמודדו ביניהם (תרשים ד'). ככל שזרוע הכוח המפעיל ארוכה יותר, כך גדל היתרון המכאני (מקדם η) של המכשיר.

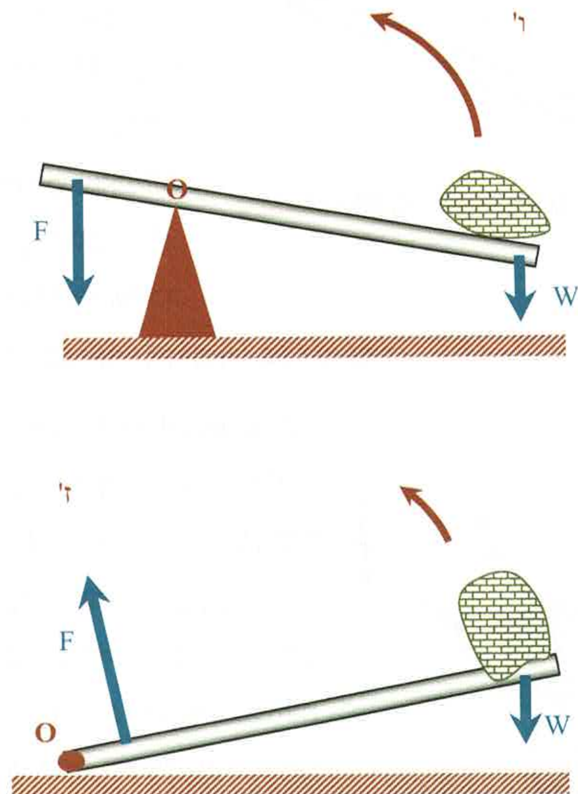


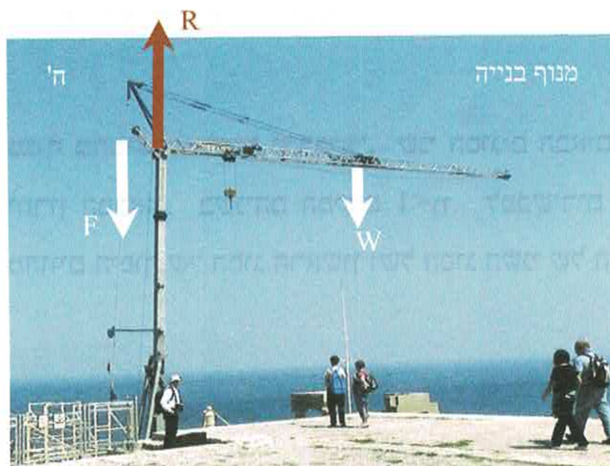
דוגמה נפוצה לסוג זה של מנוף היא מריצת בניין (תרשים ה'). בהרמת ידיות המריצה מפעילים כוחות F קטנים יותר ממשקל המריצה W. על ציר המריצה, בנקודת המגע בין הגלגל והקרקע, הופעל הכוח N. במצב מנוחה או תנועה במהירות קבועה, הכוחות מאוזנים הן מבחינת הכוח השקול והן מבחינת המומנט השקול של הכוחות. שילוב עם מכונה פשוטה אחרת, הגלגל, הופכת מריצה למכשיר רב שימושי ויעיל מאוד.



מנוף מהסוג השלישי והרביעי. שני הסוגים הבאים הם מעניינים בכך, **שאינם** מביאים יתרון המכאני. בשניהם המקדם $\eta<1$. למכשירים אלו יתרונות אחרים. שני הסוגים מהווים היפוך של הסוג הראשון ושל הסוג השני של המנופים כפי שהוצגו.

תרשים ו' מייצג את עיקרון הפעולה של המנוף מהסוג השלישי (היפוך של המנוף מסוג הראשון), ותרשים ז' – את עיקרון הפעולה של המנוף מהסוג הרביעי (היפוך של המנוף מסוג השני).



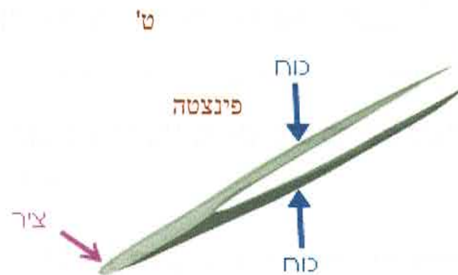


כאמור, בשני המקרים מפסיד המפעיל בכוח. אם כן, מדוע כדאי להשתמש במנופים אלה? נענה על שאלה זו בעזרת דוגמאות.

כך, למשל, בכל אתר בנייה או בנמל מסחרי אנו רואים מנוף להרמת משאות (תרשים ח'). מנוף מסוג זה מאפשר הפעלת כוח (על עמוד במשקל W), הרחוק מהמקום, בו נמצא מפעיל הכוח (הכוח F במגמה נגדית

וכוח ציר הסיבוב – R). כלומר, הרווח פה הוא המרחק עד למטרה, ועל רווח זה משלמים בהפסד בכוח, כמובן.

מנוף מהסוג רביעי הוא מכשיר אחר, פינצטה, או מלקחית (תרשים ט'), זו מהווה מכשיר, שעיקרון הפעולה שלו הוא היפוך של מנוף מהסוג השני. בעצם, הפינצטה כוללת שני מנופים מסוג זה, הפועלים זה כנגד זה (בדומה למספריים, אך הפעם בהפסד בכוח). שני הכוחות של המפעיל גדולים יותר משני הכוחות המופעלים על הגוף על ידי חודי הפינצטה.

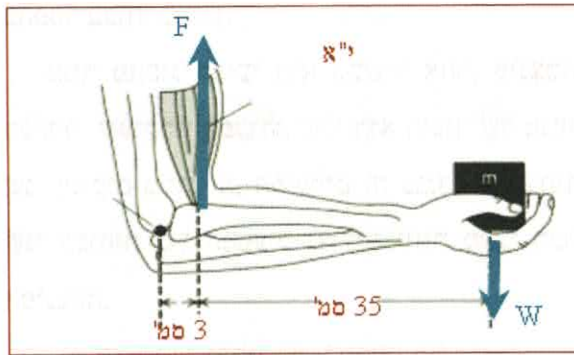


גם פה הושג יתרון של המרחק עד לגוף. תפיסת הפינצטה היא עדינה ומדויקת יותר מהתפיסה על ידי האצבעות. למעשה, מכשירים מסוג הפינצטה מאפשרים קיום של התחום המכונה "מכניקה עדינה". הפעילות הכוללת מכניקה עדינה מתבצעת על ידי שען, צורף ורופא מנתח. אלו הן רק שלוש דוגמאות מרבות אפשריות.



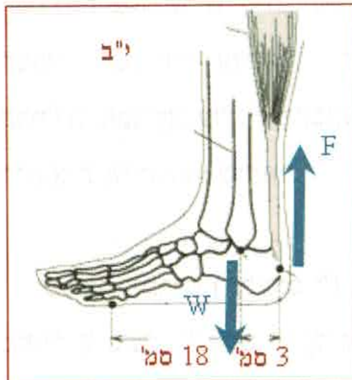
פעולת המכוש (תרשים י') או כל כלי מכני דומה, שבו מחזיקים בשתי הידיים (מקל נושא דגל, חכה, כף חפירה וכו'), מהווה שילוב של שני מנופים – השלישי והרביעי. כאשר היד הקרובה לראש הכלי מהווה ציר הסיבוב, זהו מנוף מהסוג השלישי (היפוך לסוג הראשון), וכאשר היד הרחוקה מן הראש מהווה ציר סיבוב – זהו המנוף מהסוג הרביעי (היפוך לסוג השני).

חשוב לציין, ששלד האדם יחד עם מערכת השרירים, מהווים מערכת מנופים מתוחכמת, בעיקר עם הפסדים בכוח ורווח במרחק הפעולה. לדוגמה, מפרק האמה משמש ציר הסיבוב. הכוח מופעל על ידי שרירי הזרוע, וכתוצאה מהפעלתו, היד מחזיקה את המשא,



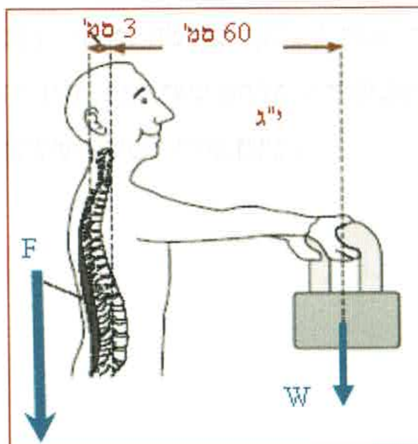
המונח על כף היד (תרשים יא'). זהו מנוף מהסוג הרביעי. את ההפסד בכוח במפרק זה נקבל מהיחס בין מרחק התפיסה של השריר לעצם האמה (כ- 3 סמ') לבין אורך האמה (כ- 35 סמ').

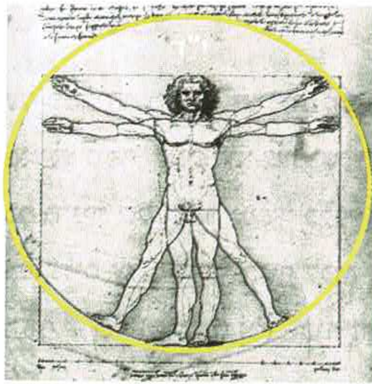
לעומת זאת, שוק הרגל מהווה מנוף מהסוג השני (תרשים יב'), אם כי כאן הרווח בכוח הוא קטן מאוד (כ-18 ס"מ לעומת 21 ס"מ). אנו עדים לפעילותו כאשר מתרוממים על קצוות אצבעות הרגליים.



כדוגמה למנוף מהסוג השלישי (היפוך של המנוף מהסוג הראשון), נביא את פעילות שרירי הגב בגוף האדם (תרשים יג').

במקרה זה בולט במיוחד ההפסד בכוח. זרוע שריר הגב היא כ- 3 ס"מ. אם אורך היד הוא 60 ס"מ, על מנת להרים משא של 100 N על השריר להפעיל כוח רב של 2000N אך, את ההפסד הגדול יש להשוות עם הרווח במרחב ההשפעה של גוף האדם. מרחב זה הוא הרווח העצום שלנו.

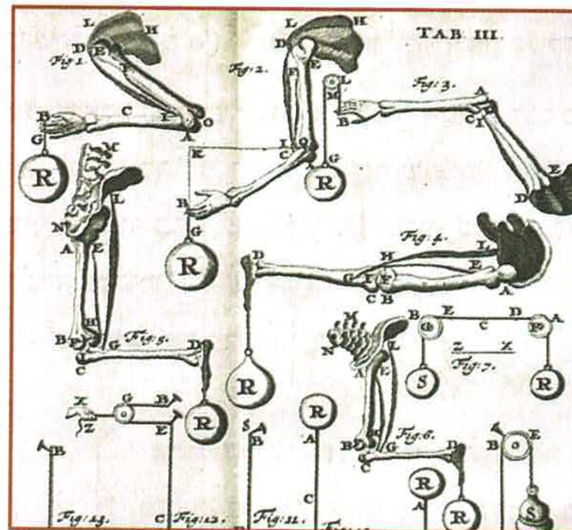




כדי להעריך את תפקידם החשוב של המנופים כמרווחי טווח הפעילות של האדם, כדאי להשוות את פעילות גוף האדם עם פעילותם של דגים או נחשים, כלומר, בעלי חיים מחוסרי גפיים.

ליתרון זה במרחב הפעילות, הודות למנופים של השלד האנושי היו מודעים מדענים מימי קדם. המדען הדגול לאונרדו דה וינצ'י צייר את טווח ההשפעה של גוף האדם כעיגול (עיגול צהוב תרשים יד').

לאונרדו דה וינצ'י במאה ה- 15 וה- 16 חקר את פעילותו של שלד האדם על מנת להבין את תפקודו, ואולי כדי לחקות ביצירת מכונות שונות. שיא המחקר בכיוון זה הושג במאה ה-17 על ידי מדען איטלקי אחר – בורלי, ושניהם המשיכו את המחקרים על פעילות המנוף של אריסטו (מהמאה הרביעית לפני הספירה) ושל ארכימדס (שפעל במאה השלישית לפני הספירה).





אריסטו
(384-322 לפה"ס)



ארכימדס
287 – 212 לפה"ס

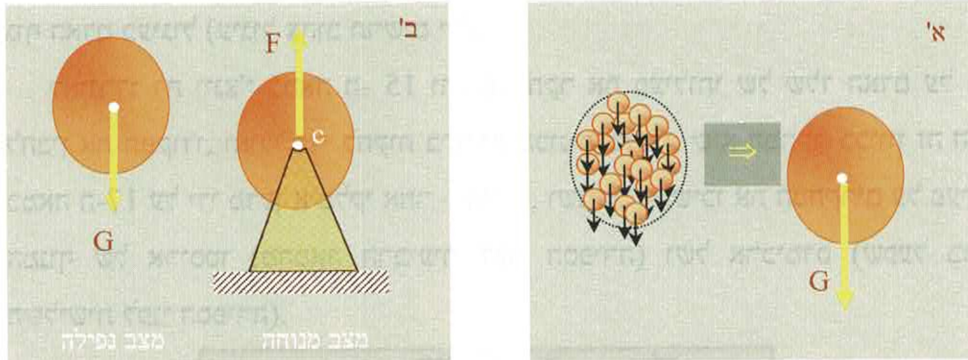


ג'וני אלפונסו בורלי
(1608-1679)



לאונרדו דה וינצ'י
(1452-1519)

על סמך הנלמד על יציבות גופים בעלי מימדים בהשפעת כוחות נוכל להרחיב את הידע בנושא נוסף, שגם הוא שימושי וחשוב, קשור להתפלגות החומר בתוך הגוף. כפי שלמדנו, כל גרגיר של חומר נמשך כלפי כדור הארץ בכוח הכובד. ניתן לסכם את הכוחות האלה, הפועלים על מרכיבי הגוף לכוח אחד, אשר אותו אנו מכנים בשם "כוח הכובד הפועל על הגוף – G" (תרשים א'). כוח זה גורם לנפילת הגוף כולו, או ליצירת משקלו, כאשר הוא



מונח על בסיס תומך כלשהו (תרשים ב'). כאמור, ניתן למדוד את משקלו במאזניים.

נשאר רק לענות על השאלה היכן יש למקם את הכוח השקול לכל כוחות המשיכה של מרכיבי הגוף, אין זו שאלה פשוטה, אך יש לה תשובה מעשית. הגיוני להצמיד את הכוח למקום כזה, שאם נתמוך בו בגוף בכוח ששווה ל- G ומכוון כלפי מעלה, נוכל לנטרל את הכוח G, והגוף יישאר נייח במקומו (תרשים ב').

בדרך זו מגדירים באופן **מעשי** את מרכז הכובד של הגוף:

מרכז הכובד של הגוף הוא נקודה כזאת, שאם נתמוך בה את הגוף בכוח השווה בגודלו לכוח הכובד, הפועל על הגוף, הגוף יישאר במנוחה.



אם נזכור את התנאים ליציבות הגוף בעל מימדים:

$F_R = 0$ (10) $\tau_R = 0$ (11)

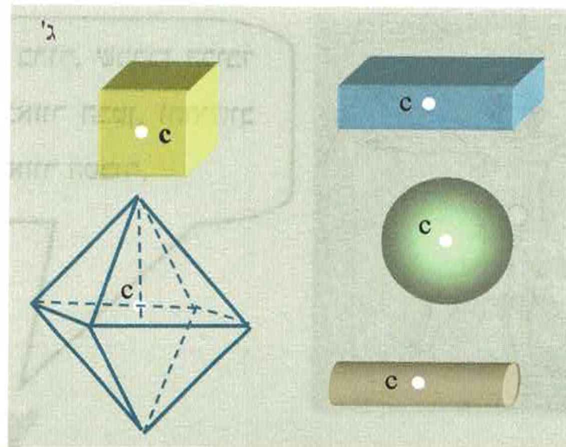
נוכל להבין את המשמעות של מרכז הכובד:



מרכז הכובד, הוא המקום, שכאשר תומכים בו את הגוף, גורמים לכך שסכום כל המומנטים של כוחות כובד,הפועלים על מרכיבי הגוף מתאפס.

במידה והגוף היה במצב ללא סיבוב הוא יישאר במצב זה.

כאמור, הדרך **המעשית** להגדיר את מרכז הכובד פשוטה, מובן, שמדובר בגופים קלים, שנוח להזיז אותם. קיימת כמובן גם הדרך **התיאורטית** לקביעת מקום מרכז הכובד, וכאשר מדובר על גוף בעל צורה מורכבת, הפתרון הוא מורכב יותר. גם אוקלידיס וגם ארכימדס, לפני כ-2200 שנים, התמודדו עם הבעיה, וקבעו את מיקום מרכז הכובד עבור גופים בעלי צורות שונות. לשם כך הם היו צריכים והצליחו, לפתור בעיות מתמטיות לא פשוטות והם אף הצליחו בכך. אולם, במקרים בהם מדובר על גופים בעלי סימטריה גבוהה (כדור, קובייה, מוט ואחרים), קל גם לנחש את המיקום של מרכז הכובד, המצוי במרכז הסימטריה של הגוף (בתרשים ג' סומן מרכז הכובד של גופים כאלה ב- c). בין המקרים המורכבים יותר נציין את המשולש, בו מרכז הכובד נמצא בנקודת החיתוך של התיכונים, ופירמידה ישרה, בה מרכז הכובד מצוי במרחק של שליש הגובה מן הבסיס (תרשים ד').

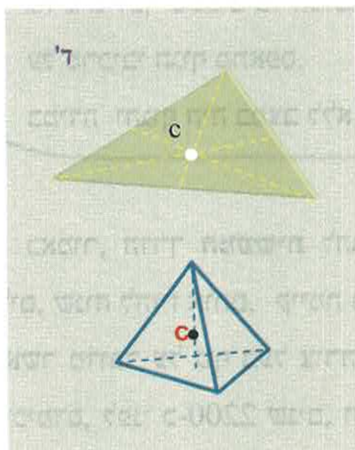




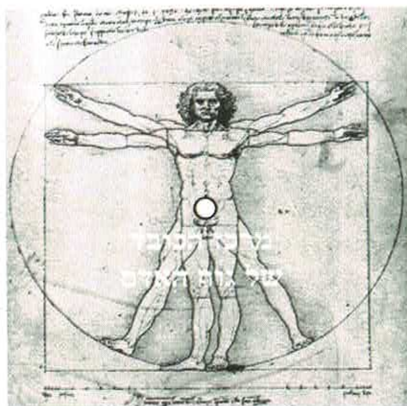
בגופים אלה קל לנחש את מיקומו של מרכז הכובד במדויק: הוא מצוי במרכז הסימטריה של הגוף.



ויש גופים שבהם לא פשוט לחשב את מיקומו של מרכז הכובד, אך על סמך ידע התכונות הגיאומטריות של הצורות ניתן לפתור אותה.

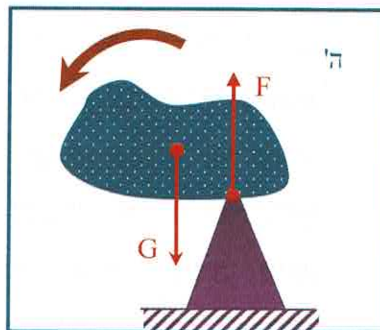


במקרים רבים אנו יכולים לנחש, במידה רבה של דיוק, את מיקום מרכז הכובד. קל לנחש, שמרכז הכובד בגוף האדם מצוי באזור הבטן, ומדידה מדויקת יותר תצביע על אזור הטבור, כפי שידעו כבר לפני כאלפיים שנה. ציור של לאונרדו דה וינצ'י מהמאה ה-15, אשר בו הוא משחזר תוצאות ניסוייו של האדריכל הרומי ויטרוויוס, שחי במאה הראשונה לספירה, לגבי היותו הטבור מרכז הכובד של גוף האדם.



גם ללא חישוב נראה ברור, שמרכז הכובד של גוף האדם מצוי באזור הבטן, והחישוב מראה שמיקומו אכן באזור הטבור.





ומה יקרה אם נתמוך בגוף שלא במרכז הכובד שלו? במקרה כזה נוצר מצב, בו על הגוף פועלים שני כוחות: כוח הכובד G והכוח שהפעלנו F, כמו בתרשים. כוחות אלה לא יוכלו לאזן זה את זה, גם אם יהיו שווים בגודלם. במצב זה נוצר מומנט של הכוח G, וכתוצאה מכך הגוף יסתובב כולו (תרשים ה'). כלומר, מצב כזה **אינו יציב** והגוף לא יישמר ללא תנועה.



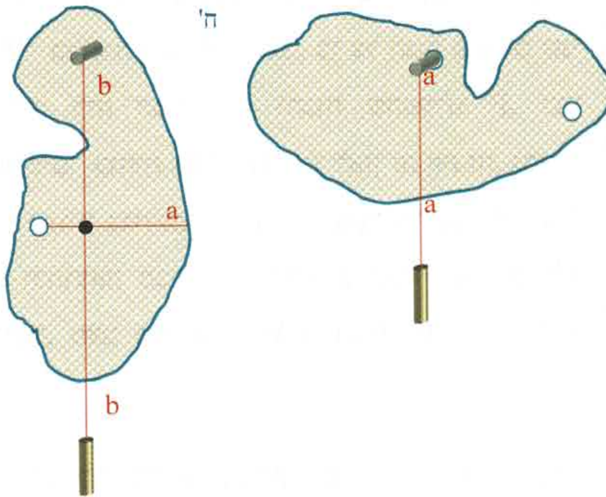
ניתן להרגיש את בעיית חיפוש מצב האיזון במקרה, שמנסים למנוע מן הסרגל ליפול, ולשם כך תומכים בו על ידי אחת האצבעות (תרשים ו'). תזוזה קטנה של האצבע מספיקה לכך, שכוח הכובד והכוח התומך לא יהיו מכוונים בקו ישר אחד, והסרגל ייפול.

נדגים שתי דרכים לאיתור מרכז הכובד בגוף. בדרך הראשונה מחפשים מקום, שתמיכה בו תאפשר לגוף להישאר ללא נפילה, כלומר, הגוף יימצא בשיווי משקל. בדרך זו כדאי להשתמש בגוף צר וארוך, כמו למשל, במטאטא (תרשים ז').



אך כאשר מדובר בגוף שטוח בעל מימדי אורך ורוחב, כדאי להשתמש בדרך אחרת (תרשים ח'): תולים את הגוף בעל הצורה השטוחה בנקודה כלשהי, ומעבירים דרכו בעזרת משקולת תלויה את קו הגובה הראשון a-a. לאחר מכן תולים את הגוף שנית, בנקודה אחרת, ובאופן דומה מעבירים קו גובה חדש b-b. שני הקווים נחתכים בנקודה, שהיא מרכז הכובד של הגוף, נקודה c. ניתן לוודא שזאת אכן נקודת מרכז הכובד, אם נחזור ונתלה את הגוף בנקודה שלישית. גם הפעם יעבור קו הגובה דרך נקודה c. מדוע?

לאחר התליה הראשונה מצאנו קו a-a. קו זה כולל את כל הנקודות, שיחסית להן המומנטים של כוחות הכובד של מרכיבי הגוף מתאפסים. ביניהן נמצא גם מרכז הכובד. בדומה, לאחר התליה השנייה של הגוף, מצאנו קו b-b עליו הנקודות הן בעלות תכונה דומה. גם ביניהן נמצא מרכז הכובד. ברור שנקודה c, השייכת לשני הקווים, היא מרכז הכובד.

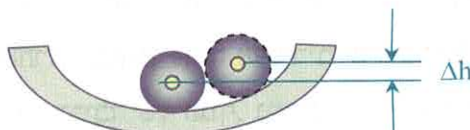


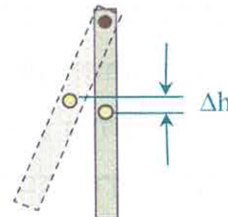
מצבי שיווי המשקל

את מצבי האיזון של הכוחות והמומנטים הפועלים על הגוף מכנים גם כמצבי **שיווי המשקל.** מבחינים בשלושה מצבים כאלה. נאפיין כל מצב כזה:

א. שיווי משקל יציב

במצב זה הגוף מצוי בסביבה אשר בה כול הזזה קטנה שלו גורמת לעלייה בגובה מעל האופק של מרכז הכובד. בעקבות כך יש לגוף אפשרות לחזור למצבו ההתחלתי, בדומה לנפילתו בעקבות פעולת כוח הכובד. כלומר, במצב זה מרכז הכובד של הגוף נמצא בנקודה הנמוכה ביותר לגבי סביבתו הקרובה של הגוף (תרשים ט'). בתרשים הודגם מצב זה על ידי כדור, הנמצא בתוך קערה, וסרגל תלוי בקצהו. בשני המקרים הזזה של הגוף ממצב שיווי משקל תלווה בחזרתו למצב זה.

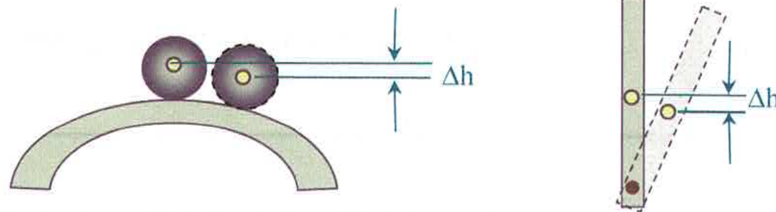




ב. שיווי משקל רופף

במצב זה הזזתו של הגוף ממקומו גורמת לירידה של מרכז הכובד בגובה על האופק (תרשים י'). לכן, ללא התערבות של כוח נוסף, הגוף לא יחזור חזרה למקומו ההתחלתי, למרות שבו היה מושג איזון הכוחות והמומנטים.

במצב זה מרכז הכובד של הגוף נמצא בנקודה הגבוהה ביותר לגבי סביבתו הקרובה של הגוף. בתרשים הודגם מצב זה עבור כדור, הנמצא בשיא הגובה של קערה הפוכה, וסרגל שנתלה בקצהו של וו והורם לגובה המכסימלי. בשני המקרים קשה לגרום למצב, בו מאוזנים הכוחות והמומנטים, וכל תזוזה קטנה ביותר תגרום לשבירת המצב.



ג. שיווי משקל אדיש

במצב זה, הזזת הגוף ממקומו אינה משנה כלל את הגובה בו מצוי מרכז הכובד מעל האופק. הגוף לא חוזר למצב ההתחלתי, אך יחד עם זאת ממשיך להימצא במצב של שיווי משקל, בו מאוזנים הכוחות והמומנטים הפועלים על הגוף. לכן מכונה מצב זה "מצב אדיש".

במצב זה הגובה, בו מצוי מרכז הכובד, נשאר ללא שינוי בעקבות כל תזוזה של הגוף בסביבתו הקרובה. כך קורה, כאשר כדור נמצא על מישור אופקי, או כאשר סרגל תלוי בדיוק במרכזו (תרשים יא'). כך גם יקרה עם כל גוף, כאשר ייתלו אותו בדיוק במרכז הכובד.



בתכנון מבנים ומכונות לסוגיהם, חשוב להבטיח להם יציבות מרבית. כלומר שוקלים מה יקרה, כאשר מסיבה כלשהי תגרם תזוזה של המבנה. האם הדבר יגרום לקריסה של המבנה?

ניתן להשיג יציבות גבוהה של המבנה כאשר:

1. מגדילים את שטח הבסיס של המבנה;
2. המיקום של מרכז הכובד נמצא נמוך ככל האפשר;
3. במקרה של צורה מורכבת של המבנה, מבטיחים, שמרכז הכובד מצוי מעל השטח, בו נשען המבנה כולו.
4. קו הגובה, המועבר דרך מרכז הכובד, עובר דרך משטח הבסיס של הגוף.

בהמשך נרחיב בנושא היציבות בהקשר לכלי שייט.



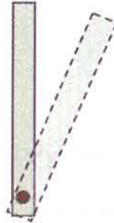
עקב השינויים בקרקע מגדל הפעמונים בעיר האיטלקית פיזה נטה משמעותית הצידה, אך המבנה עדיין לא קרס. מרכז הכובד של המגדל הנטוי מצוי מעל שטח בסיסו של המגדל. כנראה שימש המגדל מקום, ממנו שחרר גלילאו, במאה ה-17, גופים בנפילה חופשית, כדי להראות שזמן הנפילה לקרקע אינו קשור למשקל הגוף, כפי שטען אריסטו.

אם יימשכו התהליכים בקרקע, ולא יינקטו צעדים מתאימים, יקרוס המגדל באחד מן הימים.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1. במקרה המתואר בתרשים, סרגל תלוי מנקודה הנמצאת בחלקו התחתון. במצב זה הסרגל:



א. נמצא במצב שיווי משקל אדיש.

ב. נמצא במצב שיווי משקל יציב.

ג. נמצא במצב שיווי משקל רופף.

ד. לא נמצא במצב שיווי משקל.

2. בכדי להבטיח את יציבותו של מבנה מסוים, יש:

א. לדאוג שמרכז הכובד יהיה גבוה ככל האפשר ומעל לבסיס הגוף.

ב. לדאוג שמרכז הכובד יהיה נמוך ככל האפשר ומעל לבסיס הגוף.

ג. לדאוג ששטח הבסיס יהיה קטן ככל האפשר.

ד. לדאוג שקו הכובד יחרוג משטח הבסיס.

3. כדי שגוף יהיה במצב של שיווי משקל מספיק ש:

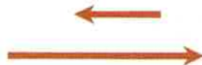
א. שקול הכוחות, הפועלים עליו, יהיה שווה לאפס.

ב. שקול המומנטים, הפועלים עליו, יהיה שווה לאפס.

ג. שקול הכוחות ושקול המומנטים, הפועלים עליו, יהיו שווים לאפס.

ד. יתקיים אחד מהתנאים בסעיפים א' ו- ב'.

4. השקול של כוחות מקבילים בעלי מגמות מנוגדות:



א. שווה להפרש הכוחות.

ב. בכיוון זהה לזה של הכוח הגדול.

ג. בעל נקודת אחיזה, הנמצאת מעבר לכוח הגדול.

ד. כל התשובות נכונות.

5. צמד כוחות הם שני כוחות השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, כדוגמת הכוחות שהידיים מפעילות על הגה המכונית. האם נכון ש:



א. שקול הכוחות שלהם שווה לאפס?

ב. שקול המומנטים שלהם שווה לאפס?

ג. ניתן להחליפם בכוח יחיד?

ד. כל התשובות אינן נכונות?

6. לצורך סגירתו של בורג מעמידים לרשותנו שני מברגים: האחד בעל ידית עבה והשני בעל ידית דקה.



א. במברג העבה יהיה קל יותר להבריג את הבורג.

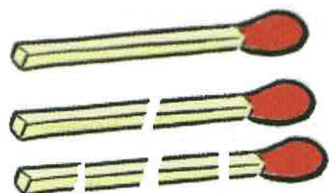
ב. במברג הדק יהיה קל יותר להבריג ת הבורג.

ג. אין הבדל באיזה מברג נשתמש להידוק הבורג.

ד. לא ניתן לדעת באיזה מברג עדיף להשתמש.

7. תלמיד שבר גפרור לשניים, ואח"כ גם שבר לשניים את מחצית הגפרור.

האם נכון ש:



א. לצורך שבירת הגפרור השלם נדרש להפעיל כוח רב יותר?

ב. לצורך שבירת מחצית הגפרור נדרש להפעיל כוח רב יותר?

ג. בשני המקרים נדרש להפעיל את אותו גודל של כוח?

ד. בשני המקרים נדרש להפעיל מומנט שונה?

8. בכדי לשאת מטאטא הנער יכול לשאת אותו בשני אופנים כמתואר בתרשימים א' ו-ב'. האם נכון ש:

א. בשני המקרים פועל אותו גודל של כוח על הכתף?

ב. יותר קל לשאת את המטאטא באופן א'?

ג. במצב ב' פחות נוח לשאת את המטאטא, כי זרוע הכוח ארוכה יותר?

ד. כל התשובות נכונות?



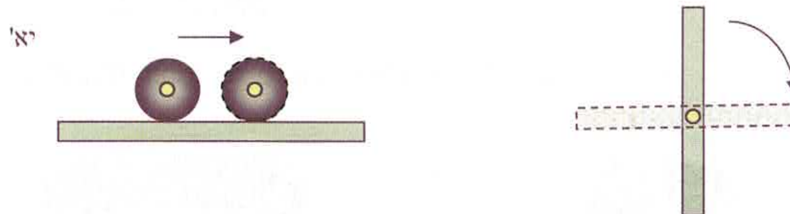
9. במקרה המתואר בתרשים, סרגל תלוי מנקודה הנמצאת במרכזו, וכדור נמצא בתנועה על מישור אופקי. במצב זה הסרגל והכדור:

א. נמצאים במצב שיווי משקל אדיש.

ב. נמצאים במצב שיווי משקל יציב.

ג. נמצאים במצב שיווי משקל רופף.

ד. לא נמצאים במצב שיווי משקל.





1. מהו גודלו של הכוח השקול של שני כוחות מקבילים, מה כיוונו והיכן נקודת אחיזתו, אם הכוחות פועלים:

א. באותה המגמה?



ב. בכיוונים מנוגדים?



2. שרטטו והסבירו מהו זרוע הכוח וכיצד נקבע אורכו.

3. הגדירו מהו מנוף. ציינו אילו סוגי מנופים ידועים לכם, והביאו שתי דוגמאות לכל סוג.

4. ציינו את התנאים לשיווי משקל של גוף כלשהו, ורשמו את השוויוניים המגדירים מצב זה.

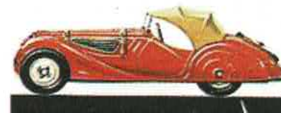
5. תארו שלושה סוגי שיווי משקל שונים, והביאו דוגמה שלא הוזכרה בספר לכל אחד מהסוגים.
מדוע קשה ללכת על קורה או על חבל התלוי בגובה?



6. א. מהו מרכז הכובד?

ב. האם ייתכן שמרכז הכובד של גוף יימצא מחוץ לגוף? אם לא – נמקו מדוע, אם כן – הביאו דוגמאות לכך.

7. הסבירו מדוע ההגה של משאית גדול מזה של מכונית נוסעים?





8. א. מהם התנאים ליציבותם של גופים?

ב. 1) מדוע מגדל גבוה הולך ונהיה צר כלפי מעלה.

2) הסבירו מדוע מכונית מרוץ נמוכה ורחבה.

9. תארו את פעולת כל אחד מהמכשירים הבאים כמנוף. סמנו את מקום הציר, ושרטטו חיצים לתיאור כיוון הפעלת הכוח ולכיוון פעולת המשא.

נדנדה



אטב כביסה



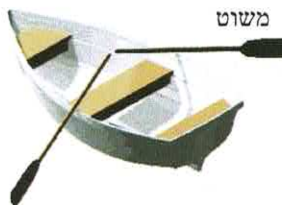
עגלת סחיבה



פלייר



משוט

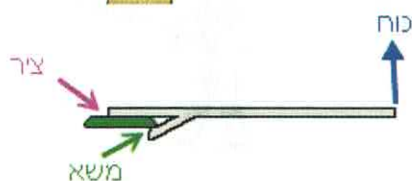


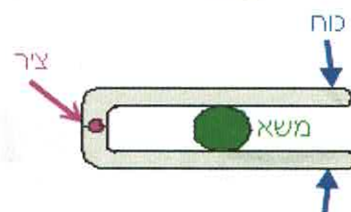
מפצח אגוזים



פותחן בקבוקים





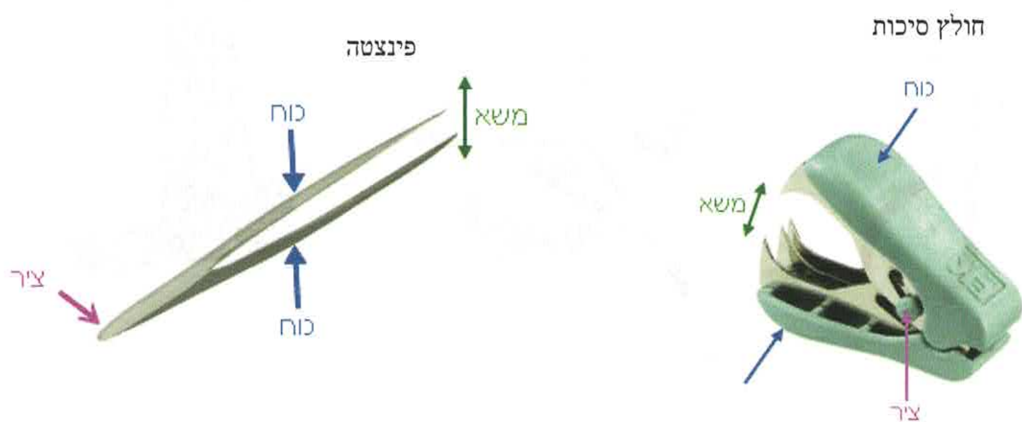


10. תארו את פעולת כל אחד מהמכשירים הבאים כמנוף. סמנו את מקום הציר, ושרטטו חיצים לתיאור כיוון הפעלת הכוח ולכיוון פעולת המשא.









11. תארו את פעולת כל אחד מהמכשירים הבאים כמנוף. סמנו את מקום הציר, ושרטטו חיצים לתיאור כיוון הפעלת הכוח ולתיאור כיוון פעולת המשא.





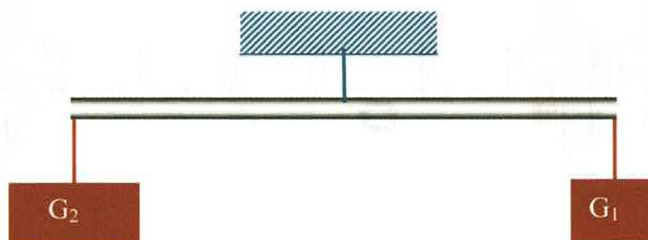




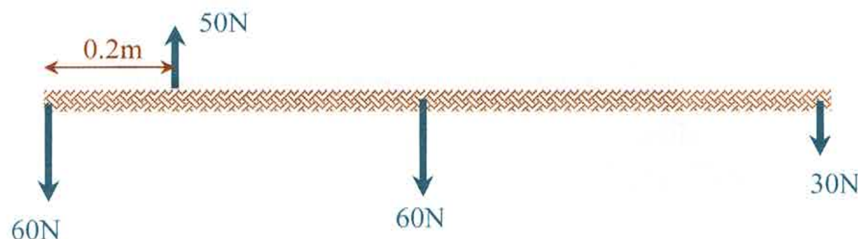


שאלות חישוב

1. בקצותיו של מוט, שאורכו 1.6m, המצוי במצב מאוזן, תלויות שתי משקולות $G_1=30N$ ו- $G_2=50N$. מצאו את הכוח השקול ואת מיקום התלייה של המוט, אם ידוע שהוא מצוי באיזון. משקלו של המוט זניח לעומת המשקולות התלויות.



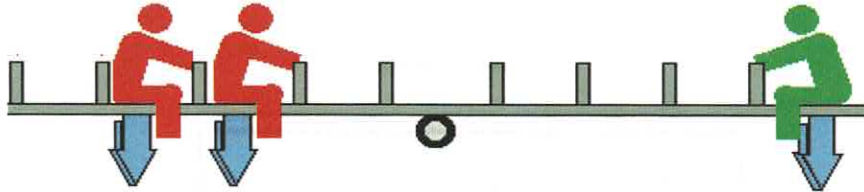
2. על קורה אחידה, שאורכה 1m, פועל כוח כובד של 60N. על הקורה פועלים 3 כוחות נוספים, כולם אנכיים לקרקע. מצאו מהו הכוח הנדרש בכדי להביא את הקורה למצב מאוזן, והיכן צריך לתלות את הקורה.



3. משאית שמשקלה 60,000N עוברת על גשר, הנתמך על ידי שני עמודים בקצותיו. מהו הכוח הפועל על כל אחד מהעמודים, ברגע שמרחקה של המשאית הוא רבע מאורך הגשר כולו?



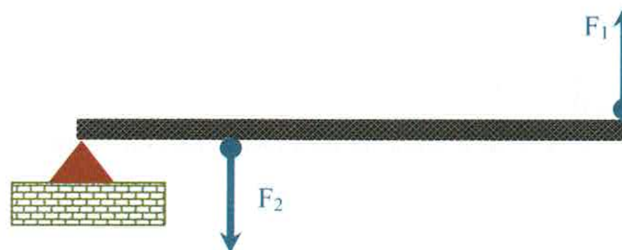
4. שלושה ילדים יושבים על הנדנדה והיא נמצאת במצב אופקי ומאוזן. מצידה השמאלי יושבים נער ונערה, שמסת כל אחד מהם 45Kg, במרחקים של 1m ו-1.2m מנקודת הציר של הנדנדה. הנער השלישי נמצא במרחק 3m ימינה מן הציר. מהו משקל הילד השלישי?



5. על הקורה הנמצאת באיזון הופעלו שני כוחות מנוגדים, כפי שמצוין בתרשים. אחד מהכוחות גדול פי 3 מהשני. כוח אחד פועל בקצה הימני של הקורה והשני ברבע אורכה. כוח הכובד הפועל על הקורה הוא 500N.

א. מהו גודל הכוח?

ב. חשבו אילו אפשרויות קיימות בבעיה?



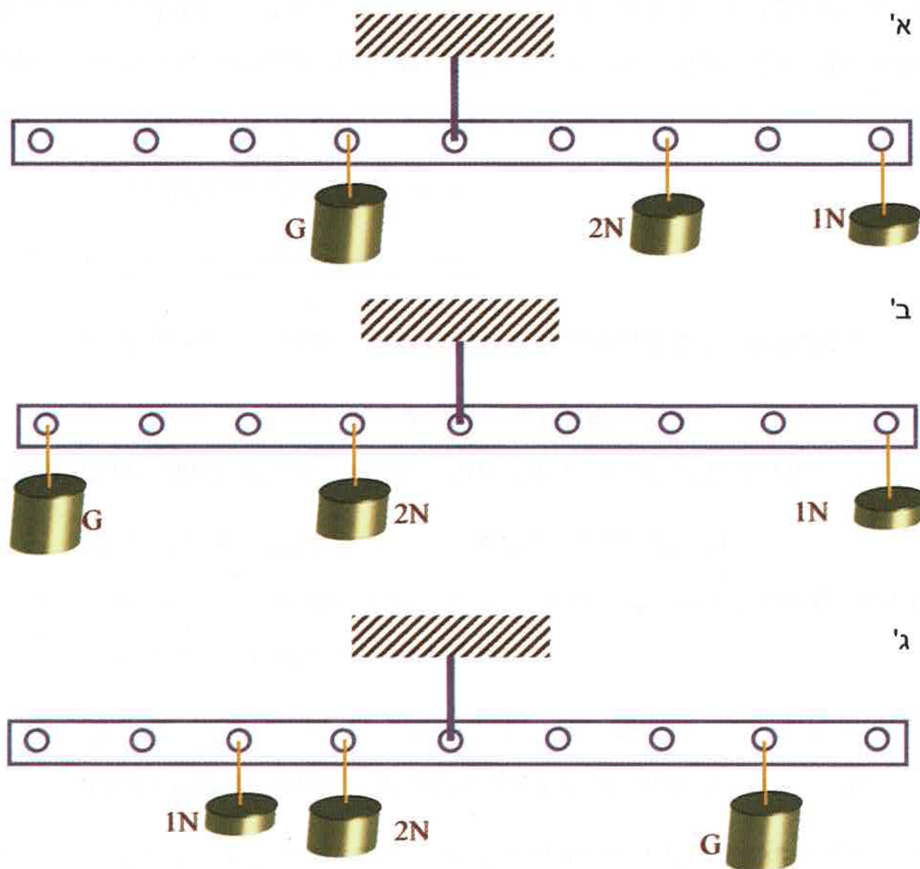
6. פועל מסיע מריצה טעונה, שמשקלה הכולל הוא 850N. אורך המריצה 1.7m. המרחק ממרכז הכובד של המריצה עד ציר הגלגל הוא 45cm.

א. לאיזה סוג של מנוף שייכת המריצה?

ב. מהו הכוח הנדרש להרמת ידיות המריצה?



7. במערכות המתוארות בתרשימים חשבו את גודלה של משקולת G, הגורמת למערכת להישאר באיזון. המרחק בין כל שני חורים סמוכים הוא 5cm. הסרגל תלוי ממרכזו.



תשובות

1. הכוח השקול 80N , במרחק של 1m מהמשקולת G_1.

2. 100N כלפי מעלה במרכז הקורה.

3. 45000N , 15000N

4. 33kg

5. F=1000N או F=90.9N

6. א. מהסוג השני. ב. 225N (על כל ידית : 112.5N)

7. א. 8N ב. 0.5N ג. 1.333N

פרק יא' - כוח המשיכה העולמי

כאשר עסקנו בכוח הכובד, ציינו, שכוח זה פועל על כל הגופים, הנמצאים על פני כדור הארץ ומושך אותם כלפי מרכזו. כוח זה גורם להיווצרות המשקל, כאשר מונעים מגוף כלשהו ליפול חופשית. תופעה זו של הימשכות גופים לכדור הארץ אינה ייחודית, אלא רק ביטוי אחד מאינסוף תופעות, בהם בא לביטוי כוח הכובד, הקיים בין כל שני גופים בעלי מסה. נזכיר מספר דוגמאות, אשר לכאורה אין כל קשר ביניהן:

1. תנועת הירח סביב כדור הארץ.
2. תנועת כוכבי הלכת סביב השמש.
3. עלייה וירידה מחזורית של מפלסי המים באוקיינוסים (גאות ושפל).

שנים רבות חיפשו מדענים אחר **חוקים פיסיקליים**, שיתארו ויסבירו תופעות אלו. כדי שנוכל לקרוא לטענה מסוימת בפיסיקה **"חוק"**, עליה לקיים מספר דרישות:

1. הטענה צריכה להצביע על קשר בין מספר גורמים פשוטים.
2. הקשר צריך להיות יציב (חוזר על עצמו בכל פעם, שמתקיימים התנאים הידועים מראש), ואינו משתנה בזמן או במקום.
3. קשר זה צריך להיות די פשוט וכללי, כדי שאפשר יהיה באמצעותו להסביר תופעות טבע או ניסויים ולאפשר ניבוי תוצאות ניסויים או הסבר תופעות חדשות.

דוגמא לחוק טבע חשוב ביותר הוא החוק שגילה **אייזק ניוטון** במאה ה-17. ניוטון היה הראשון, שהראה, שמספר גדול של תופעות אותן הזכרנו (כגון: נפילת גופים אל כדור הארץ, תנועת ירחים וכוכבי לכת, גאות ושפל), ניתן להסביר על סמך פעילות כוח אחד, שנקרא כוח המשיכה העולמי, או כוח הכובד (כי הוא גורם לכבידה של הגופים בניסיון לעצור את נפילתם). כוח זה מתאר את המשיכה ההדדית, הקיימת בין כל הגופים בעלי מסה.

חוק המשיכה העולמי, אותו גילה וניסח ניוטון, קובע:

בין כל שני גופים בעלי מסה קיימת משיכה

בכיוון הקו, המחבר בין המסות.



גודלו של כוח המשיכה נמצא **ביחס ישר למסות הגופים** והוא יורד עם הגדלת המרחק ביניהם. **היחלשות הכוח** ביחס להגדלת המרחק היא **"ריבועית"**, למשל, אם נגדיל את המרחק בין הגופים פי 3 – הכוח יקטן פי 9. הביטוי המתמטי המתאר קשר זה הוא:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}$$

F_G – כוח המשיכה בין שני גופים ביחידות ניוטון.

m_1, m_2 – מסות הגופים ביחידות קילוגרם.

R – המרחק בין הגופים ביחידות מטר.

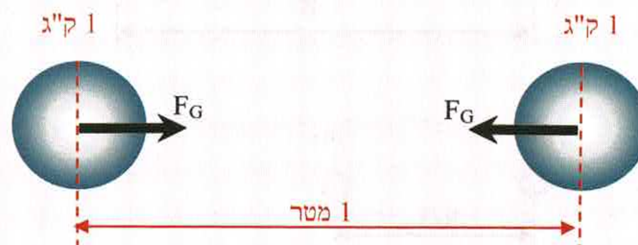
G – קבוע משיכה עולמי, ערכו ומימדו הם:

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{ניוטון} \times \text{מטר בריבוע}}{\text{קילוגרם בריבוע}}$$

המשמעות של מספר זה היא:

כוח משיכה הדדי, המופעל על כל אחד משני גופים בעלי מסה

של 1 ק"ג, המצויים במרחק של 1 מטר זה מזה.



נשים לב לפרט מאוד חשוב של חוק המשיכה העולמי: הביטוי עבור גודל המשיכה **תקף עבור גופים, הקטנים מאוד ביחס למרחק שביניהם**, ולכן אין זה חשוב, כיצד למדוד את המרחק ביניהם.

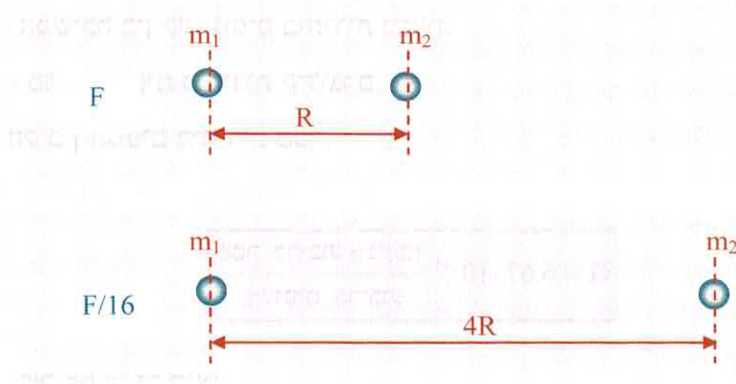
אולם, איך נחשב את הכוח כאשר תנאי זה אינו מתקיים, והגופים **גדולים** ביחס למרחק שביניהם? ניוטון ענה גם על שאלה זו. הוא הציע לחלק את הגופים הגדולים (באופן דמיוני, כמובן) לחלקים קטנים מאוד, שעבורם תקף החוק, ולאחר מכן לסכם את כל הכוחות בין זוגות חלקיקים קטנים, על מנת לקבל את כוח המשיכה בין הגופים הגדולים. הפתרון אינו פשוט לביצוע, אך במציאות הוכח כנכון.

חוק ניוטון מתקיים הן עבור כל גרמי השמים, בעלי מסות גדולות ביותר (כגון: כוכבי שבת, כוכבי לכת, שמש, כוכבי שביט וכד') והן עבור המסות של הגופים שסביבנו.

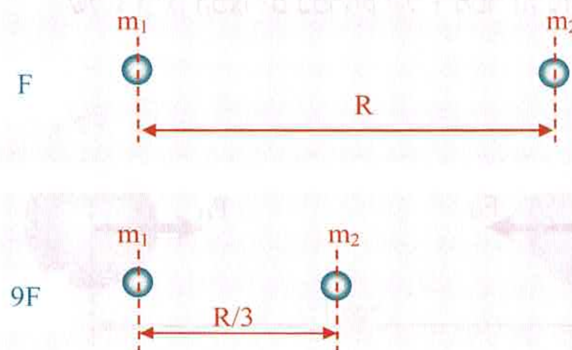
נמחיש את חוק המשיכה העולמית במספר דוגמאות.

א. גודלו של כוח המשיכה הפוך לריבוע המרחק שביניהם.

1. אם **נגדיל** מרחק בין שתי מסות פי 4 – הכוח שיפעל ביניהן **יקטן** פי 16.

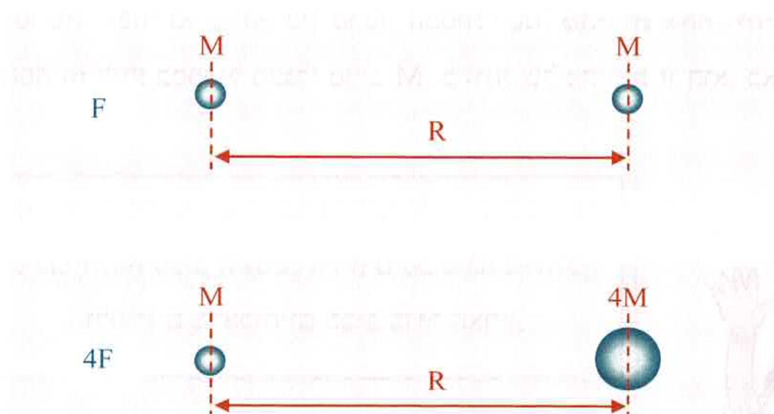


2. כאשר **נקרב** שתי מסות פי 3 מהמרחק בו היו בתחילה – הכוח ביניהן **יגדל** פי 9.

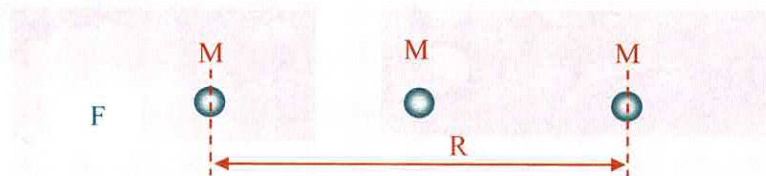


3. הכוח מתאפס, רק כאשר המסות נמצאות במרחק, השואף לאינסופי.

ב. גודלו של כוח המשיכה נמצא ביחס ישר למסות של הגופים. לדוגמא, אם נגדיל את אחת המסות פי 4 – יגדל הכוח המשיכה בין המסות פי 4 גם הוא.

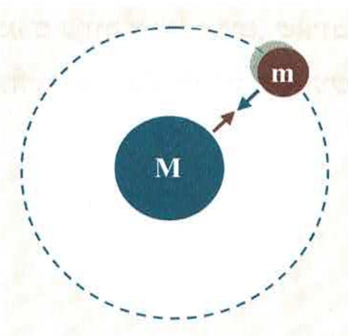


ג. כוח המשיכה, הפועל בין שני גופים מסוימים, תלוי אך ורק בגופים אלה, ואינו מושפע מגופים אחרים בסביבה. גם לגוף הנמצא ביניהם אין השפעה על גודל המשיכה שבין בני הזוג.



ד. מאחר שהשפעת הכוח היא הדדית, **הכוח בו מושך גוף אחד את הגוף השני שווה בגודלו לכוח, בו מושך הגוף השני את הראשון, אך בכיוון מנוגד.** כך, באותה מידה, אנחנו יכולים לטעון, שכל גוף על פני כדור הארץ מושך את כדור הארץ באותו כוח, שהוא נמשך על ידו.

תנועה במסלול מעגלי

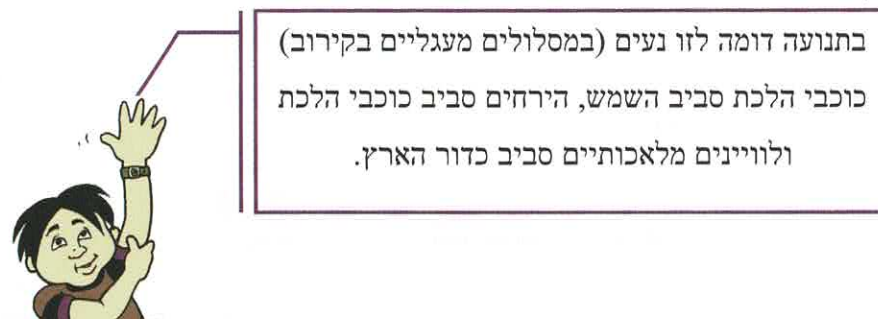


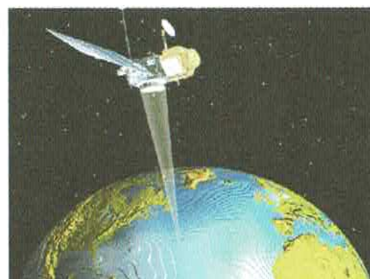
נתבונן בגוף, שמסתו גדולה מאוד M, ובגוף זעיר בעל מסה m, הנע מסביב למסה הגדולה (ראו סרטוט).

מאחר ששני הגופים מפעילים כוחות זה על זה, ייגרם **לשניהם** שינוי בתנועה.

ואולם, אם המסה M גדולה בהרבה מהמסה m, **כמעט** שלא ייגרם לה שינוי בתנועה, וניתן להניח שהיא נשארת במקומה.

כדי שהגוף הקטן יוכל לנוע במסלול מעגלי סביב המסה M, יש לתת לגוף m מהירות משיקית מסוימת. עבור כל מרחק בין מרכזי המסות ישנה **מהירות אחת ויחידה,** שאיתה תמשיך המסה m לנוע במסלול מעגלי סביב M. כיוונה של מהירות זו הוא, כאמור, **משיק** למסלול.



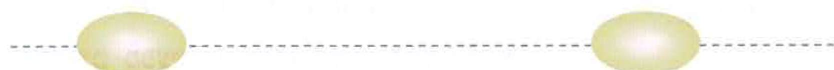




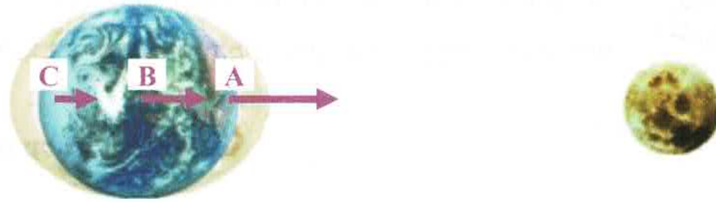
גאות ושפל

ביטוי מרשים מקבל חוק המשיכה העולמי בתופעת הגאות והשפל, המוכרת לנו היטב. ניוטון היה הראשון, שהצליח לתת הסבר נכון לתופעה זו. ההסבר לתופעה הוא בכך שעקב המשיכה

נגרם עיוות לשני גופים, שאינם קטנים בהשוואה למרחק ביניהם. כך שני כדורים הופכים להיות מאורכים בכיוון הקו הישר, המקשר ביניהם (עין באיור).



ניוטון טען, שתופעת הגאות והשפל נובעת מכך, שכוחות משיכה שונים מופעלים על ידי הירח על חלקים שונים של כדור הארץ, וכמובן גם ההיפך הוא הנכון: גם כדור הארץ גורם לכוחות דומים. המופעלים על ירח. שניהם מאבדים את הצורה הכדורית.



גם לשמש השפעה דומה, התורמת לתופעה, אך פחותה בגודלה.

נראה כיצד משפיע הירח על כדור הארץ (עיינו בסרטוט):

אזורי כדור הארץ, הקרובים יותר לירח (איזור A), נמשכים חזק יותר מהאזורים שבמרכז כדור הארץ (אזור B), ובאזור C פועל כוח חלש יותר מאשר באזורים A ו- B. מאחר שעל אזורים שונים על פני כדור הארץ פועלים כוחות שונים, הוא מתעוות כולו. העיוות הבולט נראה, כמובן, באזורים בהם יש מים ואוקיינוסים. באזורים A ו- C מתרחקים מימי האוקיינוס ממרכז כדור הארץ: איזור A "מתקרב" לירח, ואזור C אינו נמשך "מספיק" חזק ולכן "מתרחק".

כידוע, כדור הארץ נמצא בסיבוב מתמיד סביב צירו, וזמן ההקפה של סיבוב אחד הוא יממה (24 שעות). לעומת זאת הירח, הנע סביב כדור הארץ באותה מגמת סיבוב, מסיים סיבוב אחד בחודש (29.5 יום). לכן בקירוב טוב מוצדק להתייחס אל כדור הארץ כנייח (ללא סיבוב) ולהתייחס אל הירח כסובב אותו במהירות של סיבוב אחד במשך 24 שעות (בתנועה זו של הירח אנו, למעשה, צופים מעל פני כדור הארץ).

לפי הנאמר, עקב המשיכה של הירח מקבלת שכבת המים שעל פני כדור הארץ (האוקיינוסים והימים) צורת ביצה עם התארכות בכיוון אל הירח. מכך נובע, שבאזורי הארץ, הנמצאים בכיוון אל הירח, תהיה עלייה של פני הים – **גאות**, ובאזורים בכיוון המאונך לכיוון זה תהיה ירידה של פני הים – **שפל**. כלומר, שתי עליות מים ושתי ירידות. כל זה מתרחש **בו זמנית**.

המצב המתואר מסתובב יחד עם תנועת הירח בשמי הצופה על פני כדור הארץ. פרוש הדבר הוא,שבכל חוף על פני כדור הארץ יעלו וירדו המים פעמיים לסירוגין ביממה אחת.



בתקופתו של ניוטון התקבל הסבר זה בקושי רב. אחת הסיבות לכך הייתה, שבמציאות, כאשר מתרחשת תופעת הגאות והים עולה במפלסו, הירח אינו נמצא בדיוק מעל פני הים. הגל הענק של הגאות מתעכב ב"ריצתו" אחר הירח, בגלל החיכוך עם הקרקע. לכן לא היה קל כלל לקשר בין הופעת הירח ובין גאות המים בים. אך ניוטון לא נרתע מכך.

השפעת השמש על הגאות והשפל

גם לשמש השפעה על תופעות הגאות והשפל, אך היא קטנה יותר. ללא חישוב נציין, שהסיבה לכך היא אופי התלות של כוח המשיכה במרחק, כפי נקבע בנוסחה:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2}$$

בהקשר זה נוכל להסביר תופעה אחת מעניינת – השפעת השמש, הגורמת ל**הגברה ולהחלשה של הגאות והשפל**, הנגרמים על ידי הירח. כאמור, בדומה לירח, גם השמש גורמת לתופעה של גאות ושפל, עיוות של פני האוקיאנוס של כדור הארץ, אולם השפעתה כאן פחותה.

ניתן להבין, שכאשר הירח, השמש וכדור הארץ נמצאים על אותו קו פעולה (זה קורה בכל תחילת חודש עברי וגם במחציתו – ירח מלא), מחזקות שתי תופעות העיוות זו את זו וגורמות לכך, שהגאות והשפל גדולים במיוחד.

תחילת חודש עברי







ולעומת זאת, כאשר נוצרת זווית ישרה בין הקווים המחברים את מרכז כדור הארץ, מרכז הירח ומרכז השמש – הגאות והשפל קטנים יותר, וזאת משום שתופעות הגאות והשפל, הנגרמות על ידי הירח והשמש, "מתקזזות" בגלל שקווי הפעולה של כוחות

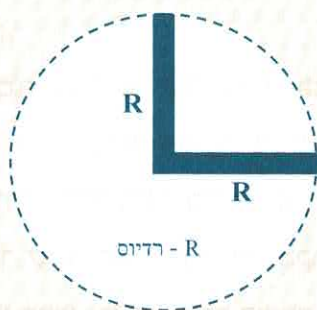
המשיכה מאונכים, והסטייה מהצורה הכדורית היא מינימאלית . עקב העובדה שהגאות והשפל, הודות לירח, הם גדולים יותר, הקיזוז אינו מלא (ראו סרטוט), ואנו עדים לעליה ולירידה של מי הים במידה קטנה מן הרגיל. זה קורה ברבע הראשון והשלישי של החודש העברי.



השפעה "מקזזת" של השמש על הגאות והשפל הודות לירח

כדור הארץ – מדוע כדור?

חוק המשיכה העולמי מאפשר לנו לענות על שאלות "תמימות" לכאורה, כגון: מדוע בעצם כדור הארץ הוא כדור? וכמו גם על השאלה: מדוע גרמי השמיים הם בעלי צורה כדורית? הראשון שהעלה את השאלה לגבי כדור הארץ והצליח לענות עליה באופן פיזיקאלי היה מייסד הפיסיקה - אריסטו, במאה הרביעית לפני הספירה, ביוון העתיקה.



עמודי חומר לוחצים על מרכז הכדור משני כיוונים. ללא סיבוב עצמי של הכדור, אורך העמודים זהה.

כפי שראינו, כל הגופים מושכים זה את זה לאורך קו ישר המחבר ביניהם. כאשר באזור מסוים מצוי חומר רב – משיכה זו גורמת להיווצרות גוש חומר אחד. לגוש זה תהיה צורת כדור. הסיבה לכך היא, שקריסת החומר עקב המשיכה נעשית **בכל כיוון במידה שווה**.

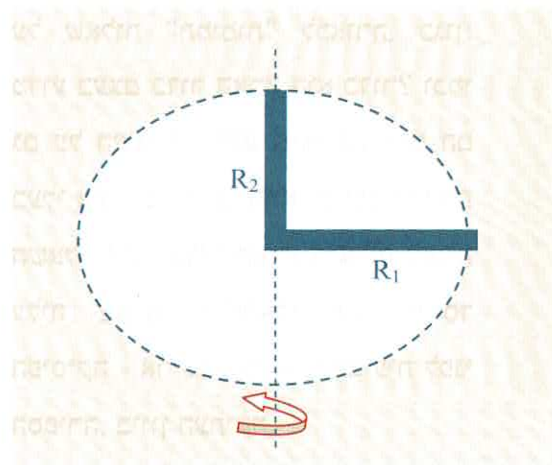
אפשר לדמיין זאת, כפי שעשה לראשונה ניוטון, אם חושבים על נקודה במרכז הכדור, הנלחצת על ידי עמודים מלאים של חומר במידה שווה בכל כיוון. המצב יהיה יציב אך ורק כאשר אורכו של עמוד החומר, בכל כיוון מהמרכז, יהיה זהה (ראו סרטוט), שאם לא כן, המשקל השונה של העמודים, העשויים מאותו חומר, יגרום לתזוזה ותיווצר זרימת חומר עד להשגת מצב של שיווי משקל. מכאן מגיעים למסקנה, שמצבו היציב של גוש חומר גדול מאוד הוא בצורת כדור, עם סטיות קטנות בלבד. במקרה של גושי חומר, שאינם גדולים במיוחד, נימוק זה אינו תקף. הבדלי הלחצים עקב סטייה מן הצורה הכדורית אינם גדולים דיים, ואכן גושי חומר כאלה אינם בהכרח כדוריים. כאלה למשל הם הלוויינים של מאדים.

לכאורה, מודל זה "דורש" שהחומר יהיה נוזלי, כדי החומר יוכל לזרום מ"עמוד" ל"עמוד" עד שתושג צורה כדורית. אולם אם מדובר בכמות מספקת של חומר, אין אף מבנה מוצק שיכול לעמוד כנגד הלחץ הגדול, ולכן מתרחשת זרימה.

בעזרת אותו נימוק ניתן להסביר, מדוע לא קיימים הרים בכוכבים, שהם בעלי צפיפות מסה גדולה מאוד. הכבידה מאלצת אותם "לקבל" את הצורה הכדורית המושלמת.

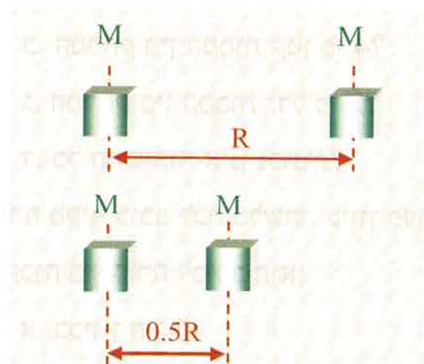
בעזרת גישה זו, של עמודי חומר דמיוניים,ניתן להסביר גם את הפחיסות של כדור הארץ.

בעקבות הסיבוב של כדור הארץ סביב צירו, עמוד החומר בכיוון קו המשווה שוקל כבר פחות, אם הוא באורך שווה לעמוד שבכיוון הקוטב. האיזון מושג, כאשר אורך העמוד בקו המשווה גדול יותר $(R_1>R_2)$. כך מתקבלת צורה של כדור פחוס בקטבים. ככל שמהירות הסיבוב גבוהה יותר, הכדור יהיה פחוס יותר. הסבר זה ניתן לראשונה על ידי ניוטון בשנת 1678 בספרו המפורסם על **העקרונות המתמטיים של הפילוסופיה של הטבע.**



עמודי חומר לוחצים על מרכז הכדור משני כיוונים.
בקיומו של סיבוב עצמי של הכדור
אורך העמודים אינו זהה.





1) שני גופים קטנים נמצאים במרחק R זה מזה. כאשר נקטין את המרחק פי 2 יפעל:

א. כוח משיכה גדול פי 2.

ב. כוח משיכה גדול פי 4.

ג. כוח משיכה קטן פי 2.

ד. כוח משיכה קטן פי 4.



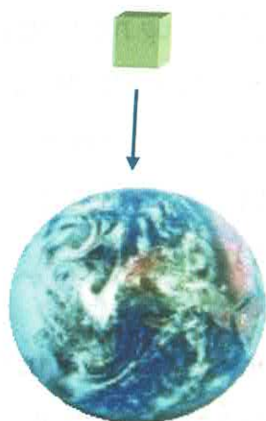
2) המערכת הבאה של מסות קטנות נמצאת במנוחה. האם נכון, שהכוח שמסה m_1 מפעילה על מסה m_2:

א. מושפע מנוכחות המסה M_3?

ב. אינו מושפע מנוכחות המסה M_3?

ג. יכול להיות מושפע רק אם המסה M_3 גדולה במיוחד?

ד. כל התשובות אינן נכונות?



3) גוף נופל מגובה מסוים אל פני כדור הארץ. האם נכון ש:

א. הגוף מושך את כדור הארץ בכוח זהה בגודלו לזה שבו מושך כדור הארץ את הגוף?

ב. הגוף אינו מושך את כדור הארץ?

ג. הגוף מושך את כדור הארץ בכוח שקטן בגודלו מזה, שבו מושך כדור הארץ את הגוף?

ד. כל התשובות אינן נכונות?

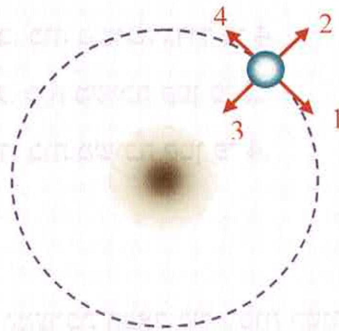
4) שתי מסות קטנות נמצאות במרחק R זו מזו. אם הכוח, הפועל בין המסות גדל פי 2, האם זה אומר ש:

א. המרחק בין המסות קטן פי 2?

ב. המרחק בין המסות קטן פי 4?

ג. המרחק בין המסות גדל פי 2?

ד. כל התשובות אינן נכונות?



5) ירח מקיף כוכב לכת כלשהו. כיוון פעולת הכוח בין הירח לכוכב הוא:

א. בכיוון חץ 1.

ב. בכיוון חץ 2.

ג. בכיוון חץ 3.

ד. בכיוון חץ 4.

6) כוח המשיכה, אותו מפעיל הירח על כדור הארץ, קטן כמעט פי 200 מזה שמפעילה השמש על כדור הארץ. הדבר נובע מכך ש:

א. מסת הירח גדולה ממסת השמש.

ב. מרחק הירח מכדור הארץ קטן ממרחק השמש מכדור הארץ.

ג. מסת השמש גדולה ממסת הירח.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

7) שתי מסות קטנות M נמצאות במרחק R זו מזו. מחליפים את אחת מהמסות במסה הגדולה פי 4, ומגדילים את המרחק בין המסות פי 2. כתוצאה מכך:

א. הכוח הפועל בין המסות יגדל פי 2.

ב. הכוח הפועל בין המסות יגדל פי 4.

ג. הכוח הפועל בין המסות יקטן פי 2.

ד. הכוח הפועל בין המסות לא ישתנה.

8) כוח משיכה בין שני גופים שווה, בקירוב, לאפס, כאשר:

א. הגופים קרובים מאוד זה לזה.

ב. המסות של הגופים קטנות מאוד.

ג. הגופים רחוקים זה מזה.

ד. המרחק בין הגופים הוא אינסופי.



חוק המשיכה העולמי

1. מה קובע חוק המשיכה העולמי?
2. ציינו תופעות, שחוק המשיכה העולמי נותן להן הסבר.
3. ציינו בקצרה את ארבע המסקנות, הנובעות מחוק המשיכה העולמי, כפי שהן מופיעות בפרק.
4. האם נכון יהיה לטעון, שכאשר גוף נופל אל פני כדור הארץ מגובה מסוים, הוא מושך את כדור הארץ בכוח זהה בגודלו לזה, שבו כדור הארץ מושך אותו? נמקו!
5. האם ייתכן מצב, בו שתי מסות בגודל שונה תפעלנה כוח זהה על מסה שלישית הנמצאת:
   א. ביניהם (על הישר המחבר את שלוש המסות)?
   ב. ימינה לשתי המסות (על הישר המחבר את שלוש המסות)?
6. אם בין כל שני גופים בעלי מסה פועל כוח משיכה, מדוע אין אתה נמשך לחברך?
7. מה צריך להיות משך זמן ההקפה של גוף, הסובב את כדור הארץ במישור של קו המשווה, כך שהוא יהיה תמיד יהיה מעל אותה נקודה מעל פני כדור הארץ?
8. הסבירו בעזרת חוק המשיכה העולמי, מדוע גוף כבד אינו נופל מהר יותר מגוף קל.
9. מהו התנאי לכך, שגוף בעל מסה m ינוע סביב גוף בעל מסה M ?
10. באיזו תקופה בחודש העברי "מתקזזות" תופעות הגאות והשפל עקב השפעות הירח והשמש? לוו את ההסבר בסרטוט מתאים.



שאלות חישוב

1. שתי מסות של 1 ק"ג נמצאות במרחק של 2 מטר זו מזו. מהו כוח המשיכה הפועל על כל אחת מהן?

2. בין שתי מסות של 5 ק"ג פועל כוח משיכה בגודל של $1.25\cdot10^{-12}$ ניוטון. מהו המרחק בין המסות?

3. מהו הכוח המופעל על כדור הארץ:

1) בגלל הירח 2) בגלל השמש





נתונים: מסת הארץ $6\cdot10^{24}$ ק"ג

מסת הירח $7.3\cdot10^{22}$ ק"ג

מסת השמש $2\cdot10^{30}$ ק"ג

המרחק בין מרכז הארץ למרכז השמש הוא $1.5\cdot10^{11}$ מטר.

המרחק בין מרכז הארץ למרכז הירח הוא $3.8\cdot10^{8}$ מטר.

4. על סמך הנתונים בשאלה 3 חשבו:

1) באיזה מרחק בין הירח לבין הארץ מתאזן כוח המשיכה של השניים?

2) באיזה מרחק בין השמש לבין הארץ מתאזן כוח המשיכה של השניים?

5. שתי מסות, האחת של 2 ק"ג והשנייה של 8 ק"ג נמצאות במרחק של 1 מטר זו מזו.

א. מהו כוח המשיכה הפועל על כל אחת מהן?

ב. מה יהיה כוח המשיכה, אם המרחק יגדל פי 4?

6. שתי מסות, האחת של 6 ק"ג והשנייה של 9 ק"ג, נמצאות במרחק של 2 מטר זו מזו.

א. היכן יש למקם מסה של 3 ק"ג כך, שהכוחות הפועלים עליה יתאזנו?

ב. כיצד תשתנה תשובתך, אם במקום מסה של 3 ק"ג תוצב באותה נקודה מסה של 8 ק"ג ?

תשובות

1. $1.6675\cdot10^{-11}$ [N] **2.** 36.52 [m] **3.** 1) $2\cdot10^{20}$ [N] 2) $3.55\cdot10^{22}$ [N]

4. 1) $37.65\cdot10^{6}$ [m] מהירח 2) $1.497\cdot10^{11}$ [m] מהשמש

5. א. $1.06\cdot10^{-9}$ [N] ב. $6.67\cdot10^{-11}$ [N] **6.** א. 1.1[m] מהמסה הכבדה

ב. לא תשתנה.

בפרק הקודם ראינו, שתופעות רבות, המתרחשות בטבע, ניתן לתאר ולהסביר על ידי המושג כוח המשיכה העולמי. אולם, ישנן תופעות רבות אחרות, אותן ניתן לתאר ולהסביר, אם באופן דומה נגדיר מושג חדש – כוח חשמלי, גם הוא בסיסי בטבע. על כך נדון בפרק זה.

בדומה לכוח המשיכה, גם הכוח החשמלי פועל מרחוק. כזכור, כוח הכבידה פועל בין כל שני גופים בעלי מסה, וגודלו נקבע על ידי תכונה זו של החומר, המכונה **מסה**.

לעומתו, הכוח החשמלי נקבע על ידי תכונה אחרת של החומר, המכונה – **מטען**. נוסיף לכינוי גם "חשמלי", כי בפיזיקה הוגדרו מטענים שונים.

חשיבות הכוח החשמלי היא עצומה: כוח זה מסביר שתי פנים, שניהם בסיסיים ביותר, של המציאות:

א. תכונות החומר

כשאנו אומרים "תכונות החומר" אנו מתכוונים לתכונות כגון חוזק, אלסטיות, פלסטיות, מצב צבירה ועוד הרבה אחרות. ניתן להבין אותן באופן כולל, אם משתמשים במושג כוח חשמלי, הפועל בין המטענים החשמליים שבתוך החומר. כך ניתן להסביר את כוחות **האלסטיות והחיכוך**, אותם תיארנו קודם ככוחות, הפועלים במגע בין הגופים.

ב. מבנה החומר

לאחר מאמצים רבים של מחקר מדעי התברר, שהכוח החשמלי, הפועל בין חלקיקי היסוד של החומר, (הפרוטון והאלקטרון) מאפשר קיום **אטומים** – תאי יסוד של החומר, מרכיבים בסיסיים של יסודות בטבע, כגון ברזל, נחושת, חמצן וכו'. עקב פעולת כוחות בין האטומים, הם יוצרים קבוצות יציבות, המכונות **מולקולות**. אלו יוצרים מגוון רחב ובלתי מוגבל של חומרים שונים, כגון: מים, מלח, סוכר וכו'. היציבות והתכונות השונות של כל אלה נקבעים במידה רבה על ידי הכוח החשמלי. את תכונות החומרים חוקרים בתחומי מדע שונים, כגון: כימיה, ביולוגיה, גיאולוגיה ועוד רבים אחרים.

למרות חשיבותו המרכזית של הכוח החשמלי, כוח זה אינו מתגלה סביבנו באופן בולט כמו כוח המשיכה של הכבידה. הסיבה לכך היא, שבין המטענים החשמליים פועל גם כוח **משיכה וגם כוח דחייה**, כך שבדרך כלל הם מתקזזים ונותנים לכוח הכובד לבלוט.

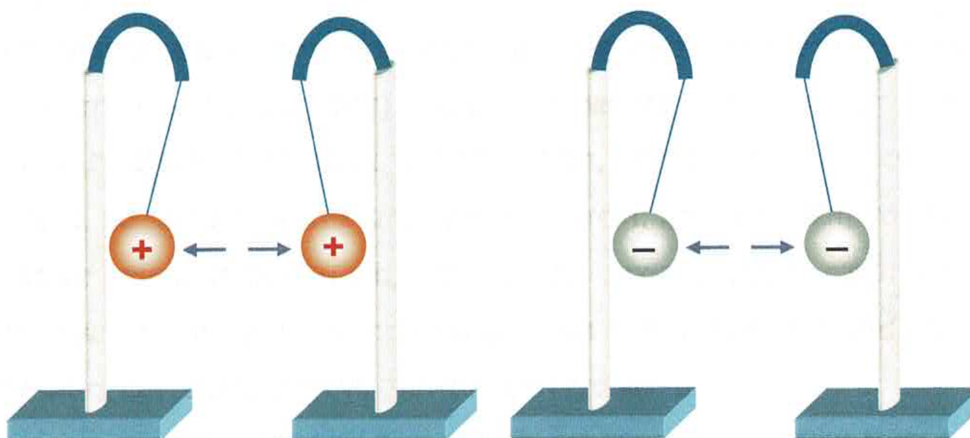
בין המטענים החשמליים של החומר קיימת גם משיכה וגם דחייה.

כדי לגרום לכוח חשמלי לבלוט יש להפר את האיזון בין הדחייה והמשיכה. דוגמא לכך הבאנו בפרק א', כאשר שפשוף סרגל פלסטיק במטלית צמר גרם לפיסות נייר קטנות להימשך אל הסרגל.

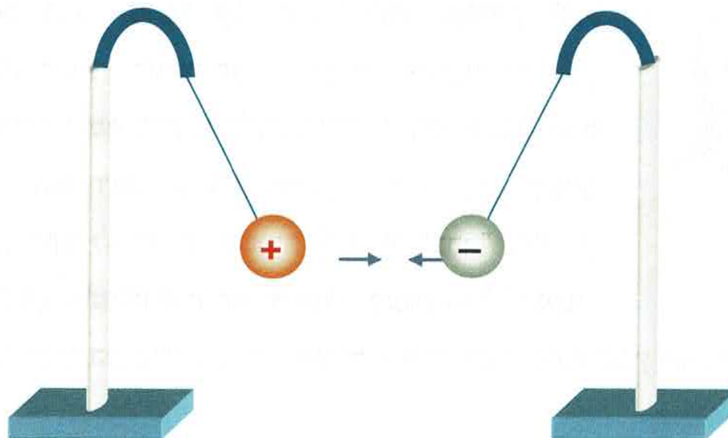
אנו מסבירים תופעה זו ודומות לה בכך, שכאשר משפשפים את הסרגל במטלית הצמר, עוברים אלקטרונים מחומר אחד (מטלית הצמר) לחומר אחר, שבמגע איתו (הסרגל), וכך גורמים לשינוי מצבם של הסרגל והמטלית: בחומר אחד מופיע עודף, ובשני- חוסר באלקטרונים. לשינוי בחלוקת האלקטרונים בין הגופים קוראים **טעינה**. לאחר טעינת הגופים, המשיכה והדחייה החשמליים אינם מאוזנים יותר, והם מתחילים לבלוט באופן מעשי במשיכה בין הגופים.

נתקדם בהסבר התופעה: מניסויים רבים התברר, שניתן לתאר את המצב על ידי הנחה, שקיימים שני סוגי מטענים, המכונים **"חיוביים"** ו- **"שליליים"**. מטענים מאותו סוג דוחים זה את זה, ומטענים מסוגים שונים מושכים זה את זה.

בין גופים הטעונים במטען שווה סימן קיימת דחייה:



בין גופים, הטעונים במטען שונה סימן, קיימת משיכה:



במצב רגיל, כמות המטענים מכל סוג (חיובי או שלילי) שווה בתוך כל גוף, והדחייה והמשיכה מאוזנים. (ניתן להמחיש את המצב על ידי השוואה עם המספרים האלגבריים: כאשר מחברים את המספר החיובי 5+ עם המספר השלילי 5- , מקבלים 0).

כאמור, לאחר הטעינה, האיזון בין המטענים החיוביים והשליליים מופר, והגוף הופך להיות טעון. **מטען** הגוף נקבע על ידי **ההפרש** בין מספר האלקטרונים שבו לבין מספר הפרוטונים שבו. התברר גם, שרק האלקטרונים יכולים לנוע או לעזוב גוף אחד ולהגיע לגוף שני. במהלך השפשוף של שני גופים ובמעבר האלקטרונים ביניהם, גוף אחד נטען חיובית (חוסר אלקטרונים) והשני – שלילית (עודף אלקטרונים). כתוצאה מכך נוצרת משיכה ביניהם.

גוף טעון שלילית – גוף שיש בו עודף אלקטרונים.

גוף טעון חיובית – גוף שיש בו חוסר אלקטרונים.

גוף ניטרלי – גוף שבו מספר האלקטרונים שווה למספר הפרוטונים.




שארל- אוגסטין דה קולון

לאחר שבמאה ה-17 ניוטון קבע את התיאור המדויק לחוק המשיכה, במאה ה-18 , המדען הצרפתי שארל- אוגסטין דה קולון ניסה לבצע מחקר דומה בהקשר לכוח החשמלי, הפועל בין גופים טעונים. האם חוק דומה מתאר משיכה ודחייה של מטענים חשמליים? הבדיקה לא הייתה פשוטה (המטען "ברח" מהר מן הגופים הטעונים), ולמרות זאת הצליח קולון בשנת 1784 לאשר, שהכוח בין המטענים החשמליים מציית לתלות, הדומה מאוד לזאת שבין המסות.

חוק קולון:

> בין שני מטענים "קטנים" פועל כוח (משיכה או דחייה),
> גודל הכוח נמצא ביחס ישר לגודלם של המטענים
> וביחס הפוך לריבוע המרחק ביניהם.
> כיוונו של הכוח הוא בכיוון הישר, המחבר את מרכזי שני הגופים.

גם פה, כמו במקרה של משיכת הכבידה, היה צורך לציין, שעל הגופים הטעונים להיות "**קטנים**", כלומר, גודלם קטן לעומת המרחק שביניהם.

גם פה, כמו במקרה של משיכת כבידה, היה מדובר בכוח, הפועל בכיוון הקו, המקשר בין המטענים. כוח זה מכונה בשם **כוח מרכזי** (כי הוא מכוון לפי הקו המקשר בין מרכזי הגופים).

הביטוי המתמטי לחוק קולון:

$$F_e = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}$$

F_e – כוח חשמלי, הפועל בין שני מטענים, ביחידות ניוטון.

q_1, q_2 – כמות המטען, ביחידות קולון.

R – המרחק בין המטענים, ביחידות מטר.

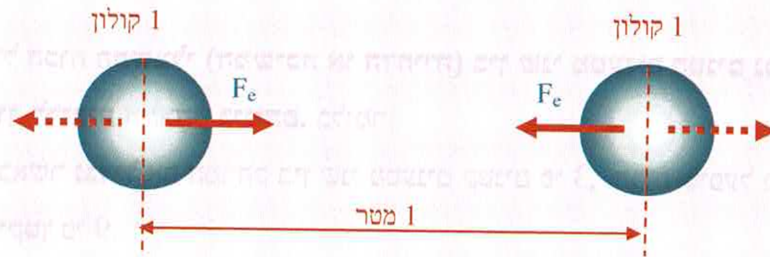
K – קבוע הכוח החשמלי, שיחידותיו : $\frac{\text{ניוטון} \times \text{מטר בריבוע}}{\text{קולון בריבוע}}$.

ערכו המספרי של K הוא: $K = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ניוטון} \times \text{מטר בריבוע}}{\text{קולון בריבוע}}$

המשמעות של מספר זה היא:

הכוח, הפועל בין שני מטענים קטנים של 1 קולון,

שיימצאו במרחק של 1 מטר זה מזה.



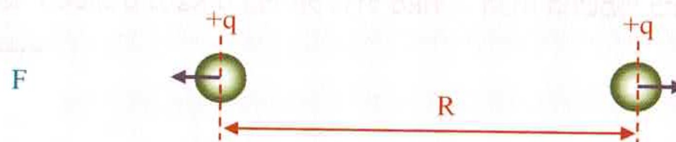
הופעת הקבוע K בחוק קולון, כמו הופעת הקבוע G בחוק הכבידה, קשורה בבחירת היחידות למדידת הגדלים, המשתתפים בחוק: מטען, מרחק, כוח. אף אחד לא קבע עבורנו אילו יחידות לבחור למדידת הגדלים; בחרנו אותן על דעת עצמנו. הטבע אינו חייב "להתחשב" בבחירה החופשית הזו, ולכן מופיע המקדם המתאם: קבוע K (או G). מספר זה נראה אולי מוזר, אולם הכרחי, לאחר שנקבעו מטר, ק"ג, שנייה – כל אחת באופן שרירותי.

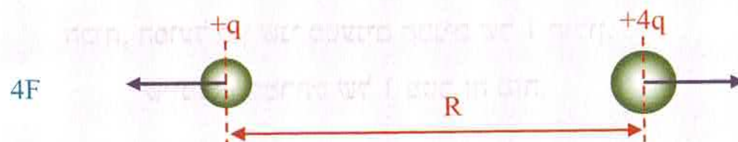
באמצעות חוק קולון ניתן להגדיר ***יחידת מטען חשמלי*** המכונה **"קולון"** לכבוד שרל אוגסטן קולון:

> אם בין שני כדורים קטנים, הטעונים במטען זהה ונמצאים
> במרחק של 1 מטר ביניהם, פועל כוח דחייה של $9 \cdot 10^9$ ניוטון,
> אזי מטענו של כל אחד מהכדורים הוא 1 קולון.

נחזור ונמחיש את חוק קולון ואת התכונות האופייניות לפעילות הגומלין החשמלית.

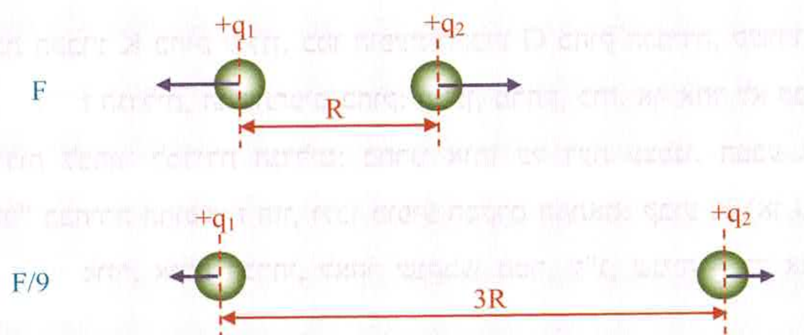
א. התלות הישרה של הכוח החשמלי בשני המטענים פירושה, שאם מגדילים את מטענו של אחד הגופים פי 4, יגדל הכוח הפועל בין הגופים פי 4.



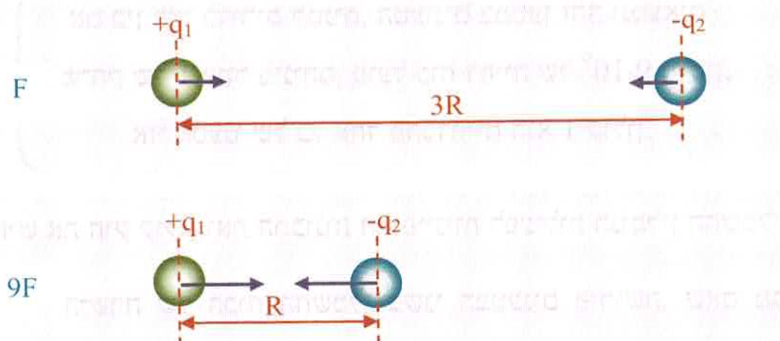


ב. **גודל הכוח החשמלי (המשיכה או הדחייה) בין שני מטענים קטנים נמצא ביחס הפוך לריבוע המרחק ביניהם.** כלומר:

1. כאשר **נגדיל** את המרחק בין שני מטענים קטנים פי 3, הכוח שיפעל ביניהם **יקטן** פי 9.

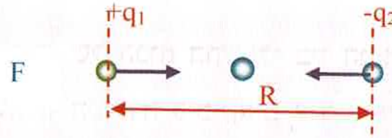


2. התלות ההפוכה לריבוע המרחק בין המטענים פירושה, שאם **נקטין** את המרחק בין שני מטענים פי 3, הכוח שיפעל ביניהם **יגדל** פי 9.



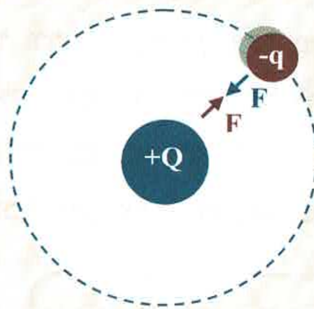
3. כאשר המטענים נמצאים במרחק גדול מאוד – הכוח החשמלי ביניהם מתאפס בקירוב.

ג. נוכחות מטענים אחרים בסביבה (גם כאשר הם מצויים בין הגופים הטעונים) אינה משנה מאומה מהכוח החשמלי (משיכה או דחייה), הפועל בין שני מטענים מסוימים.



ד. בהתאם לחוקי הכוח, גם **השפעתו של הכוח החשמלי היא הדדית**. כלומר, **הכוח בו מושך או דוחה מטען אחד את המטען השני שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו** לכוח, בו המטען השני מושך או דוחה את המטען הראשון.

תנועת מטען במסלול מעגלי



נדמיין מטען חשמלי +Q צמוד למקום מסוים (כך שלא יוכל לנוע). מטען נוסף -q חופשי לנוע. בין שני המטענים פועל **כוח משיכה חשמלי**. כמו במקרה של לוויין, הנע במסלול מעגלי סביב כדור הארץ הודות לכוח המשיכה, כך גם במקרה הנדון, ניתן ליצור מערכת דומה, ובה מטען אחד סובב את המטען השני. בגלל שלחוק הכוח החשמלי צורה זהה לחוק הכבידה, גם כאן עבור כל מרחק R בין המטענים קיימת **מהירות אחת ויחידה**, שאם נקנה אותה למטען -q בכיוון הניצב לקו המחבר בין המטענים, ינוע המטען -q במסלול מעגלי סביב המטען +Q (תרשים).

בתחילת המאה העשרים חשבו פיזיקאים, כגון ארנסט רתרפורד באנגליה, שלאטום יש מבנה כמו למערכת השמש: במרכז נמצא גרעין, המורכב מפרוטונים, ומסביב לגרעין סובבים




ארנסט רתרפורד
1871 - 1937

אלקטרונים כמו כוכבי הלכת, הסובבים את השמש, אולם מהר מאוד התברר, שמודל זה שגוי אם כי הוא מבטא נכונה תכונות מסוימות של האטום האמיתי.

שדה חשמלי

כאמור, ההשפעה של הכוח החשמלי בין המטענים היא מרחוק, ללא מגע. **כיצד ייתכן הדבר?** שאלה זו הטרידה פיסיקאים עוד מימי קדם. רבים שללו אפשרות זו כעקרון. ניוטון גם הוא שאל את השאלה, אך נאלץ להשאירה ללא מענה פיסיקלי. נוצר מצב מעניין: כוח הכבידה, ואחרי כן גם הכוח החשמלי, תארו והסבירו נכונה הרבה תופעות, אך התשובה הבסיסית, איך פועל הכוח מרחוק נשארה ללא מענה.

תשובה אפשרית לכך הציע המדען האנגלי **מייקל פרדיי** במאה ה- 19. הנה תשובתו:



מייקל פרדיי
1867 - 1791

מטען חשמלי Q+, הנמצא במקום מסוים, יוצר שינוי במרחב סביבו, כך, שעל מטען נוסף q+, הנמצא בקרבת מקום, יפעל כוח חשמלי. כלומר, אנו מסבירים את השפעתו מרחוק של הכוח החשמלי בכך, שהמטען Q+ יוצר סביבו שדה חשמלי, אשר ממלא את המרחב שסביב המטען. את השדה מאפיינים באמצעות גודל, המכונה: עוצמת השדה.

> עוצמת השדה החשמלי בנקודה מסוימת מוגדרת
> ככוח חשמלי, שיפעל על יחידת מטען חיובי, שיוצב בנקודה זו.

באופן מתמטי הביטוי לעצמת השדה ניתן אם כן על ידי היחס:

$$E = \frac{F_e}{q}$$

כאשר מסמנים:

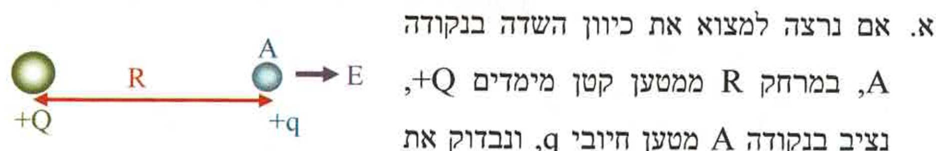
E – עוצמת השדה

F_e – הכוח החשמלי הפועל המטען החשמלי

q – גודל המטען החשמלי

כיוונו של שדה חשמלי בנקודה מסוימת מוגדר ככיוון **הפעולה של כוח חשמלי שיפעל, על מטען חיובי,** שיוצב בנקודה זו.

דוגמאות:



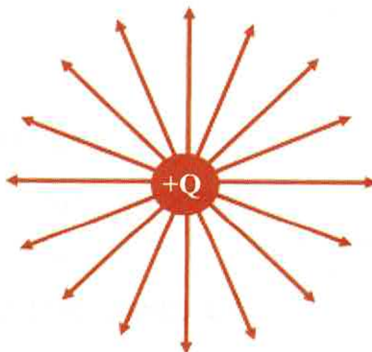
א. אם נרצה למצוא את כיוון השדה בנקודה A, במרחק R ממטען קטן מימדים +Q, נציב בנקודה A מטען חיובי q, ונבדוק את כיוון הכוח, שיופעל עליו. במקרה זה נקבל **דחייה**, כלומר: כיוון השדה הוא מהמטען +Q.



ב. אם במקום מטען +Q נציב מטען דומה -Q ונבדוק שוב את כיוון השדה בנקודה A, נציב מטען חיובי q בנקודה A והפעם נקבל **משיכה**, כלומר: כיוון השדה הוא אל המטען -Q.

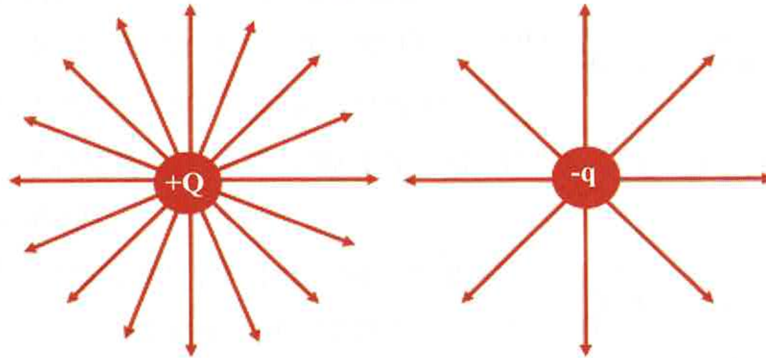
מחוק קולון נובע, שההשפעה החשמלית על מטען, המובא לסביבה של המטען Q, הולכת ונחלשת עם הגדלת המרחק ממנו. מכאן גם שעוצמת השדה החשמלי מסביב למטען Q נחלשת, עם גדילת המרחק מן המטען, היוצר את השדה. כדי לבטא רעיון זה באופן חזותי, פרדי הציע דרך לתאר את השדה החשמלי בעזרת קווים. נדגים את תיאור השדה במקרים פשוטים.

המקרה הפשוט ביותר הוא של מטען חיובי קטן. ניתן להציג את השדה במקרה זה כחיצים, היוצאים מן המטען באופן רדיאלי לכל הכיוונים. לתמונה זו יתרון ברור: היא מבטאת את העובדה שציינו: עצמת השדה נחלשת עם המרחק מן המטען. הביטוי הוא בצפיפות הקווים: צפיפות גדולה – עוצמת שדה גדולה, צפיפות קווים קטנה – עצמת שדה קטנה.



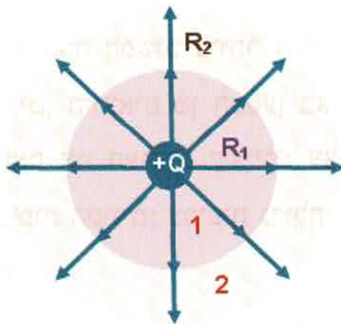
מכאן, כאשר מתארים שדה של שני מטענים, השונים בגודל, יש להקפיד, שמהמטען הגדול יותר ייצאו מספר רב יותר של קווים, פחות או יותר ביחס ישר לגודל המטען (כמתואר בסרטוט).

שדה חשמלי של מטען חיובי: Q>q

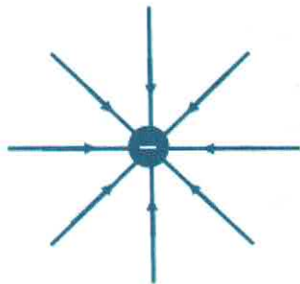


צפיפות קווי השדה מייצגת את **עוצמת השדה** בכל נקודה במרחב.

ייצוג השדה בעזרת קווי שדה מאפשר לנו לדעת את כיוון הכוח, שיפעל על המטען החיובי, שיוצב בכל נקודה שהיא סביב המטען Q, ה"יוצר" את השדה. ואכן, ככל שאנו מתרחקים מהמטען, צפיפות הקווים הולכת וקטנה.



בסרטוט מתואר השדה של מטען חיובי Q, ולכן כיוון השדה הוא רדיאלי החוצה. באזור, שמסומן ב- 1, הקווים צפופים יותר מאשר באזור, שמסומן במספר 2. כלומר, עוצמת השדה בנקודות שבמרחק R_2 מן המרכז קטנה יותר מהנקודות, הנמצאות במרחק - R_1 ממנו.



בדוגמה הבאה מתואר שדה חשמלי של מטען שלילי. השדה של המטען מיוצג על ידי קווים רדיאליים, המכוונים אל תוך המטען מכל הכיוונים.

באמצעות קווי שדה ניתן גם לתאר **מערכת של מספר מטענים**. גם במקרים אלה נשמר העיקרון: צפיפות הקווים מייצגת את עוצמת השדה החשמלי באותו אזור, ולכן, גם את הכוח שיפעל על מטען חיובי, שיושם באותו המקום.

נציג תמונות שדה של שני מטענים בלי לפרט, כיצד הן התקבלו.

א. קווי שדה סביב זוג מטענים שסימנם מנוגד

ב. קווי שדה סביב זוג מטענים חיוביים

ג. קווי שדה סביב זוג מטענים שליליים

מהתבוננות בתרשימים, המייצגים את השדה החשמלי הנוצר על ידי מטענים, ניתן להבחין במספר תכונות כלליות :

א. קווי שדה תמיד יוצאים ממטען חיובי ומסתיימים במטען שלילי או באינסוף, שפירושו: מחוץ לסרטוט.

ב. קווי שדה אינם חותכים זה את זה.

ג. קווי שדה אינם נוגעים זה בזה.

סיכום הכוח החשמלי:

1. הכוח חשמלי בין המטענים החשמליים של חלקיקי היסוד, האטומים והמולקולות קובע את מבנה החומר ואת תכונותיו הפנימיות, כגון: גמישות ומצב צבירה, ואת תכונותיו החיצוניות, כגון: חיכוך וצורת גבישים.
2. הכוח החשמלי פועל ממרחק ללא מגע בין הגופים.
3. טעינה – הפרת האיזון בין מספר האלקטרונים ומספר הפרוטונים שבגוף. טעינה מתרחשת כאשר שני גופים נמצאים במגע ועל ידי שפשוף.
4. עודף אלקטרונים, לעומת פרוטונים, גורם לטעינה שלילית, וחוסר אלקטרונים – לטעינה חיובית של הגוף. בדרך כלל הגופים שסביבנו אינם טעונים (מספר האלקטרונים והפרוטונים שווה).
5. מטענים חשמליים מאותו סוג (חיובי או שלילי) דוחים זה את זה, ומסוגים שונים – מושכים.
6. חוק קולון: בין שני מטענים קטנים פועל כוח, שגודלו נמצא ביחס ישר לגודל המטענים והפוך לריבוע המרחק שביניהם.

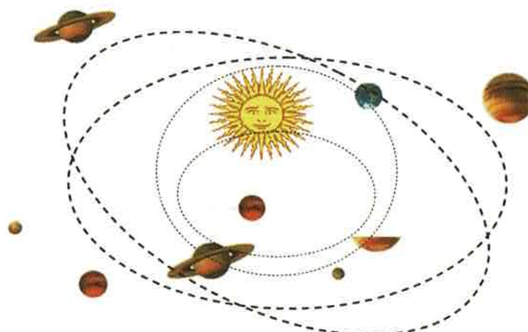
$$F_e = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}$$

$$K = 9 \cdot 10^9 \, \frac{\text{ניוטון} \times \text{מטר בריבוע}}{\text{קולון בריבוע}}$$

7. הכוח החשמלי הוא **כוח מרכזי**, כלומר, כיוון פעולת הכוח בין שני מטענים קטנים הוא בכיוון הישר המחבר ביניהם.
8. ניתן להסביר את השפעת המטען החשמלי על מטענים אחרים שסביבו בעזרת שדה חשמלי. עוצמתו של השדה בנקודה מסוימת מוגדרת ככוח, שיפעל על יחידת מטען חיובי, שיוצב בנקודה זו.
9. מקובל לתאר את השדה החשמלי באופן חזותי בעזרת קווי שדה, המייצגים הן את כיוון השדה והן את עוצמתו (צפיפות הקווים).
10. ככל שמתרחקים מהמטען שיצר את השדה, נחלשת עוצמתו, וכביטוי לכך קטנה צפיפות קווי השדה.

השוואה בין כוח המשיכה העולמי ובין הכוח החשמלי

	כוח משיכה העולמי	הכוח החשמלי
החוק המתאר את הכוח	חוק ניוטון הכבידה העולמית	חוק קולון השפעה חשמלית
הביטוי המתמטי	$F_g = G\frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}$	$F_e = K\frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}$
המקדם לתאום יחידות	$G = 7 \cdot 10^{-11}$ $\frac{\text{ניוטון} \times \text{מטר בריבוע}}{\text{קילוגרם בריבוע}}$	$K = 9 \cdot 10^{9}$ $\frac{\text{ניוטון} \times \text{מטר בריבוע}}{\text{קולון בריבוע}}$
תלות בגורמים	מסות של הגופים (יחס ישר) המרחק בין הגופים (תלות ריבועי הפוך)	מטענים של הגופים (יחס ישר) המרחק בין המטענים (תלות ריבועי הפוך)
פעילות גומלין	משיכה	דחייה (מטענים דומים) משיכה (מטענים הפוכים)
אופי הפעילות	כוח מרכזי (פועל לאורך הקו המחבר בין המסות) פועל מרחוק	כוח מרכזי (פועל לאורך הקו המחבר בין המטענים) פועל מרחוק
תחום פעילות משמעותי	כאשר לפחות אחד מן הגופים הוא בעל מסה גדולה מאוד (שמש, כדור הארץ, ירח) , הכוח שולט בתופעות מקרוסקופיות בין גרמי השמים	כאשר מופר איזון בין המטענים החיוביים לשליליים, הכוח שולט בתופעות מיקרוסקופיות בתוך החומר, וקובע את מבנהו ואת תכונותיו.
עוצמת השדה	מוגדרת ככוח הכבידה, הפועל על יחידת מסה בנקודה מסוימת.	מוגדרת ככוח החשמלי, הפועל על יחידת מטען בנקודה מסוימת.







1) הכוח החשמלי פועל:

א. בין כל שני גופים.

ב. בין כל שני גופים טעונים.

ג. רק בין שני גופים, הטעונים במטענים מנוגדים.

ד. רק בין שני גופים, הטעונים במטענים זהים.

2) גוף טעון כאשר:

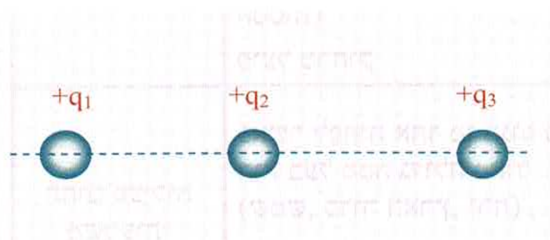
א. מספר האלקטרונים שבו גדול ממספר הפרוטונים.

ב. מספר האלקטרונים שבו קטן ממספר הפרוטונים.

ג. נוספו לגוף או הוצאו מהגוף אלקטרונים.

ד. כל התשובות נכונות.

3) מערכת המטענים הבאה נמצאת במנוחה. האם נכון שהכוח שמטען q_1^+ מפעיל על מטען q_2^+:



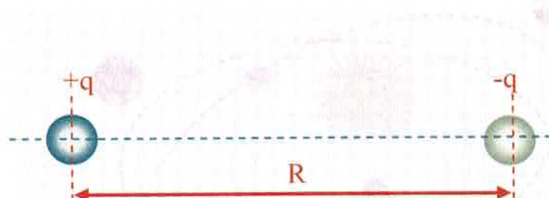
א. מושפע מנוכחות המטען q_3^+?

ב. אינו מושפע מנוכחות המטען q_3^+?

ג. מושפע מ- q_3^+ כאשר q_3^+ גדול במיוחד?

ד. כל התשובות אינן נכונות?

4) שני מטענים קטני מידות q^+ ו- q^- נמצאים במרחק R האחד מהשני. האם נכון ש:



א. הכוח הפועל ביניהם שווה לאפס?

ב. על המטען q^+ פועל כוח גדול יותר מאשר על המטען q^- ?

ג. על המטען q^+ פועל כוח קטן יותר מאשר על המטען q^- ?

ד. כל התשובות אינן נכונות?

5) שני מטענים קטני מידות q^- ו- q^+ נמצאים במרחק R. אם במקום מטען q^- נציב באותו המקום מטען $-2q$:

א. יפעל בין המטענים כוח דחייה גדול פי 2.

ב. יפעל בין המטענים כוח משיכה גדול פי 2.

ג. יפעל בין המטענים כוח דחייה גדול פי 4.

ד. יפעל בין המטענים כוח משיכה גדול פי 4.

6) שני מטענים קטני מידות, בעלי מטען זהה $+q$, נמצאים במרחק R. אם נרחיק את המטענים עד המרחק 4R:

א. יפעל בין המטענים כוח דחייה קטן פי 4.

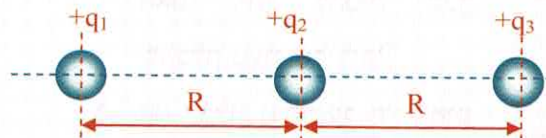
ב. יפעל בין המטענים כוח משיכה קטן פי 4.

ג. יפעל בין הגופים כוח דחייה קטן פי 16.

ד. יפעל בין המטענים כוח משיכה גדול פי 16.

7) שלושה מטענים קטני מידות טעונים חיובית ונמצאים במרחקים שווים על אותו הישר (כמתואר בסרטוט). האם נכון ש:

א. אם $q_1=q_3$, על מטען q_2 לא יפעל כוח?

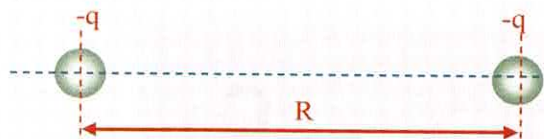


ב. אם $q_1>q_3$, המטען q_2 ינוע שמאלה?

ג. אם $q_1=q_2$, על המטען q_3 לא יפעל כוח?

ד. תשובות א' ו- ב' נכונות?

8) שני מטענים קטני מידות, בעלי מטען זהה q^-, מונחים על אותו הישר במרחק R זה מזה. מעוניינים להניח מטען נוסף q^+, כך שלא יפעל עליו כוח. לשם כך יש להניחו:



א. בין שני המטענים.

ב. שמאלה משני המטענים.

ג. ימינה משני המטענים.

ד. בדיוק באמצע המרחק בין שני המטענים.

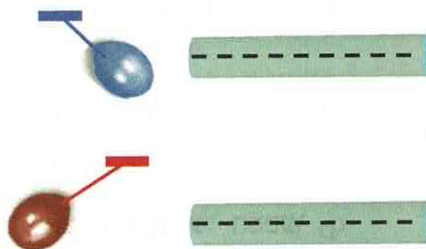


הכוח החשמלי

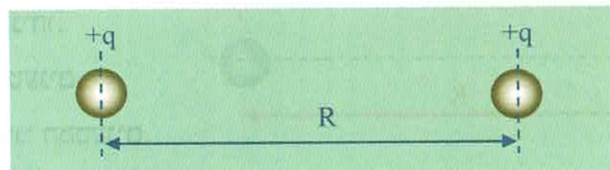
1. מה קובע חוק קולון?
2. הגדירו מהי יחידת מטען "קולון".
3. ציינו בקצרה את המסקנות הנובעות מחוק קולון.
4. כיצד מוגדרת עוצמת השדה החשמלי בנקודה מסוימת?
5. כיצד ניתן לדעת את כיוון השדה החשמלי ואת עוצמתו, כאשר יש סרטוט של קווי שדה?
6. בין אילו גופים פועל הכוח החשמלי, וכיצד ניתן להביא את הגופים למצב, שבו פועל ביניהם כוח חשמלי?
7. מהו ההבדל בין אופי פעולת הכוח החשמלי לאופי פעולת כוח המשיכה העולמי?
8. מקרבים מוט זכוכית, הטעון חיובית, אל בלון התלוי בחוט.

   א. אם הבלון נמשך אל המוט, האם ניתן להסיק מכך, שהבלון טעון שלילית?

   ב. אם הבלון נדחה על ידי המוט, האם ניתן להסיק מכך, שהבלון טעון חיובית? נמקו!



9. נתונים שני מטענים קטני מידות בעלי מטען זהה q^+. היכן יש להניח מטען נוסף, כך שלא יפעל עליו כוח? האם יש חשיבות לגודל המטען או לסימנו? נמקו!



10. מה קובע הכוח החשמלי בתכונות החומר?

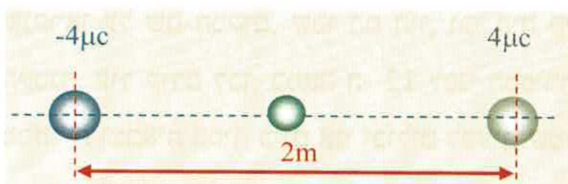


שאלות חישוב

1. שני מטענים נקודתיים של $5\mu C$ נמצאים במרחק של 0.5 מטר זה מזה. מהו גודלו של הכוח החשמלי, הפועל ביניהם?



2. שני מטענים נקודתיים של $4\mu C$ ו- $-4\mu C$ נמצאים במרחק של 2 מטר זה מזה. מהו הכוח, שיפעל על מטען שלישי של $1\mu C$, הנמצא במרחק של 1 מטר מכל אחד מהמטענים?

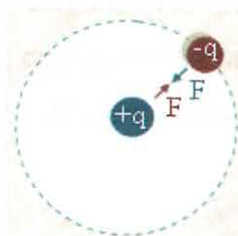


3. שני מטענים נקודתיים של $8\mu C$ ו- $12\mu C$ נמצאים במרחק של 40 ס"מ זה מזה. היכן לאורך הקו המחבר ביניהם יש להניח מטען של $5\mu c$, והוא יישאר במקום? כיצד תשתנה תשובתכם אם המטען הוא של $-5\mu C$?

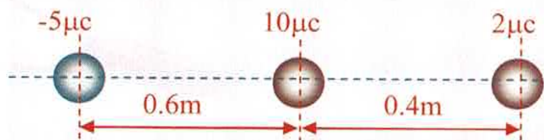
4. מהו גודלו של הכוח החשמלי, הפועל על אלקטרון, המסתובב מסביב לפרוטון ברדיוס של 10^{-10}מטר?

נתונים: מטען האלקטרון [C] $-1.6\cdot10^{-19}$

מטען הפרוטון [C] $+1.6\cdot10^{-19}$



5. מהו הכוח הפועל על כל אחד מהמטענים (גודל וכיוון) ?



תשובות

1. 0.9 [N] **2.** 0.072 [N] שמאלה **3.** 0.22 [m], לא תשתנה **4.** [N] $2.3\cdot10^{-8}$

5. 1.035 [N] ימינה (על מטען ימני) , 0.125 [N] שמאלה (על אמצעי) , 1.34 [N] ימינה (על שמאלי)

פרק י"ג - הכוח המגנטי

תיארנו שני סוגי מצבים בהם נוצרת השפעה (משיכה או דחייה) בין גופים, המתוארים באמצעות כוח כבידה וכוח חשמלי. שני מצבים אלה אינם ממצים עדיין את כל האפשרויות. עוד מימי קדם מוכרים לאדם סלעים טבעיים, המגלים גם הם יכולת מיוחדת של משיכה ודחייה. מתועד, שלפני כ- 2500 שנה ביוון, היו מוכרים סלעים, שמהם הוכנו מגנטים, שנקראו על שם המקום, שבו הם היו, ובו היה קל למצוא אותם: בעיר מגנסיה שבאסיה הקטנה. עוד קודם לכן, במאה ה- 12 לפני הספירה, נעשה שימוש במגנטים לניווט תנועה מסחרית וצבאית בסין. כיום אנו יכולים לטעון, שמספר עופרות וגופים העשויים ממתכת:

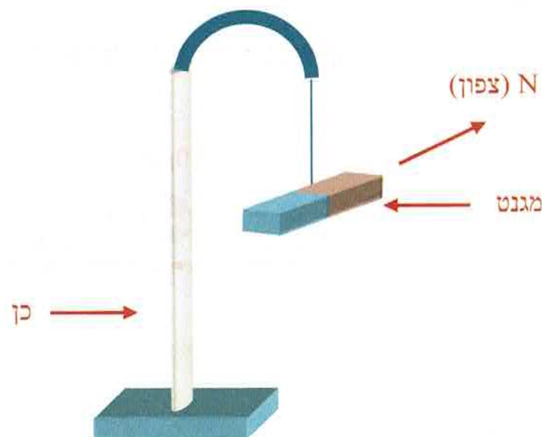
א. מושכים אליהם גופים אחרים, העשויים ברזל.

ב. מסתדרים באופן טבעי כך, שאחד הקצוות תמיד פונה לכיוון הצפון.

החומרים הנמשכים למגנט הם: ברזל, פלדה, ניקל, קובלט ונתכים אחדים.

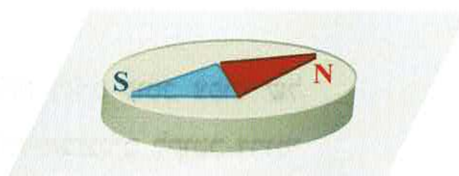
קטבים מגנטיים

ניקח מגנט בצורת מוט ונתלה אותו על כן באמצעות חוט (ראה סרטוט). בולט מיד, שמכל מצב ממנו נשחרר את המגנט, הוא יסתובב לכיוון מסוים, יבצע מספר תנודות, ובסופו של דבר ייעצר בכיוון **צפון- דרום**.



הקצה הפונה לכיוון צפון מכונה **קוטב צפוני** של המגנט, וסימונו המקובל הוא **N**. הקצה השני, המסתדר לכיוון דרום, מכונה **קוטב דרומי** של המגנט, וסימונו המקובל הוא **S**.



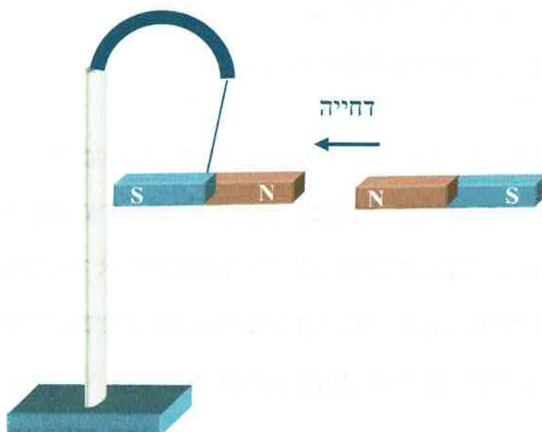


תכונה זו של המגנט – התייצבותו סביב הכיוון צפון- דרום – הביאה לשימוש במגנט ככלי מרכזי בניווט. חץ מגנטי, שמאפשרים לו לנוע באופן חופשי, ללא חיכוך משמעותי, ולשנות את כיוונו במרחב, מהווה את הליבה של המכשיר העתיק המכונה: **מצפן**. בדרך כלל במצפן יש מחט מגנטית, המחוברת לציר. החץ נשאר מכוון לצפון למרות הסיבוב של גוף המצפן. מטבע הדברים, המצפן רגיש לנוכחות של מתכות ומגנטים בסביבתו הקרובה, כי הם יכולים לשבש אותו.

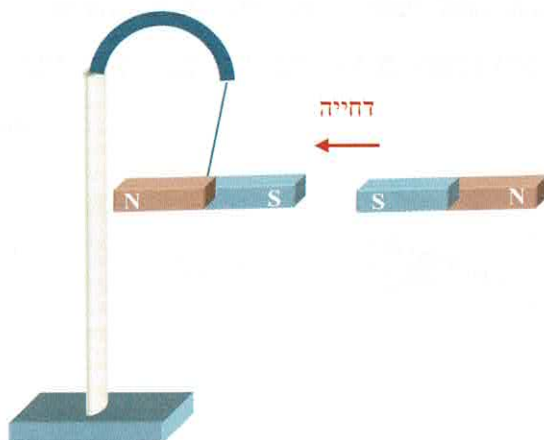
כאמור, אנו מתייחסים למצפן, כמצביע על הצפון הגיאוגרפי. אך למעשה אין הדבר כך. המצפן מורה לכיוון אזור מסוים בצפון קנדה בו מצוי הקוטב המגנטי של כדור הארץ ולא הקוטב הגיאוגרפי. עבורנו בישראל, הסטייה בין שני הכיוונים קטנה, אולם עבור תושבי פלורידה שבדרום מזרח ארצות הברית, למשל, השגיאה היא כבר משמעותית.

הכוח בין הקטבים המגנטיים

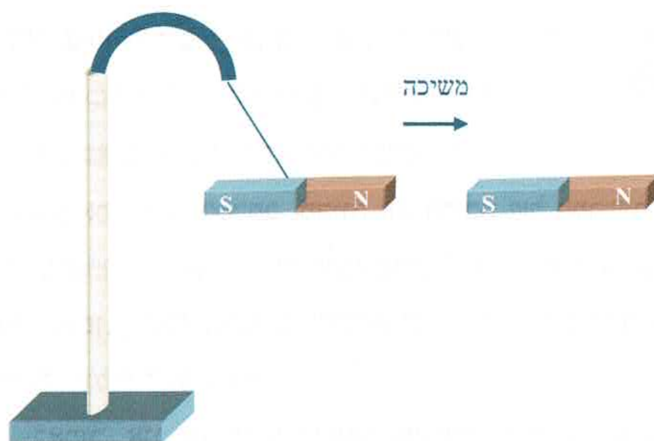
נתלה מוט מגנט על כן ונקרב אליו מוט מגנט אחר, באופן ששני הקטבים הצפוניים פונים זה אל זה (ראו סרטוט). אנו עדים לכך, ששני המגנטים דוחים אחד את השני.



גם כאשר ננסה לקרב את שני הקטבים הדרומיים של המגנט זה אל זה, נרגיש שוב **דחייה**.



עתה נקרב קוטב צפוני של אחד המגנטים לקוטב דרומי של המגנט האחר. המגנטים **יימשכו** זה אל זה.



מכאן הכלל:

בין שני קטבים זהים של מגנטים קיימת דחייה
בין שני קטבים שונים של מגנטים קיימת משיכה.

תופעת המגנטיות משכה את תשומת ליבם ואת סקרנותם של האנשים לא פחות מהתופעות, המלוות את הטעינה במטען חשמלי. על סמך ניסויים ומחקרים נוסח חוק המתאר את ההשפעה בין שני מוטות מגנטיים. גם זה נעשה על ידי קולון, אשר קבע, שבין שני מטענים חשמליים נוצר כוח, אשר גודלו נמצא ביחס ישר לעוצמת הקטבים וביחס הפוך לריבוע המרחק שביניהם. חוק זה מכונה בשם **חוק קולון לקטבים מגנטיים** וביטויו המתמטי הוא:

$$F = K'\frac{p_1 \cdot p_2}{R^2}$$

F - כוח המשיכה, או הדחייה, הפועל בין שני קטבים מגנטיים, ביחידות ניוטון.

p_1, p_2 - עוצמת הקטבים המגנטיים, ביחידות מיוחדות: אמפר למטר.

R - המרחק בין הקטבים המגנטיים.

K' - קבוע הכוח המגנטי, שערכו המספרי ויחידותיו הם: $K' = 10^{-7}\ \frac{\text{ניוטון}}{\text{אמפר בריבוע}}$



תפקידו של K' דומה לזה של קבוע G בחוק ניוטון וקבוע K בחוק קולון עבור מטענים חשמליים: הוא מתאם בין היחידות, שנבחרו עבור הגורמים שבנוסחה.

בגלל זהות הצורה של החוקים גם **המסקנות** מחוק הכוח לקטבים מגנטיים זהות לאלה של החוק עבור מטענים חשמליים, ולא נחזור עליהן.



אנדרה- מרי אמפר
1836 - 1775

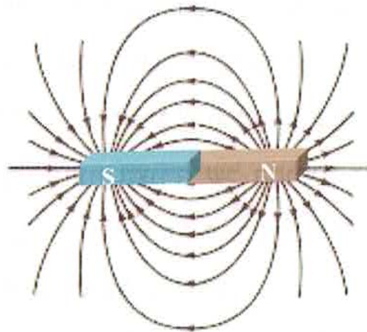
אולם, בין מגנטים ומטענים חשמליים ישנו הבדל מהותי ביותר.

אמנם, מהחוק נראה כאילו הקטבים המגנטיים מהווים למעשה **מטענים מגנטיים**, אולם התברר שמטענים כאלה אינם קיימים בטבע. כתוצאה מכך, הקטבים המגנטיים אינם קיימים כבודדים אלא רק בזוגות!

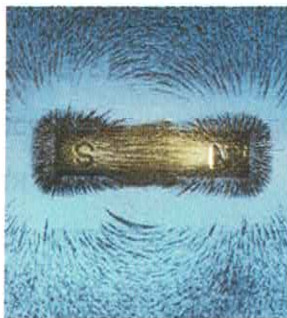
ככל שנשבור מגנט כלשהו למספר חלקים , תמיד מכל חתיכת מגנט נקבל מגנט שלם בעל שני קטבים. המדען הצרפתי **אנדרה מרי אמפר** היה הראשון שהסביר את התכונה ה"מוזרה" הזו של המגנטים, ואנו נחזור לכך בהמשך.

תכונה זו של הופעה בזוגות בלבד מגבילה את השימוש בחוק קולון המגנטי, ועושה אותו למסובך ולא נוח. פיסיקאים מכירים דרכים לעקוף קושי זה, והדרך השימושית ביותר היא באמצעות שדה מגנטי.

ניקח מוט מגנט ונניח אותו מתחת לדף נייר דק ומתוח, או מתחת למשטח זכוכית שקופה. נפזר נסורת ברזל על הנייר או על הזכוכית. כאשר נקיש קלות על הנייר או על משטח הזכוכית, הודות להשפעת המגנט הנסורת תסתדר בצורה מסוימת. נקישות על המשטח עוזרות לנסורת הברזל "להתגבר" על החיכוך עם המשטח ולהסתדר במצבה החדש, הפעם בהתחשב ב"הוראות" המגנט. דגם הסידור של נסורת הברזל, המתקבל על המשטח, נראה דומה לצורות של קווים המובאות בסרטוטים הבאים.

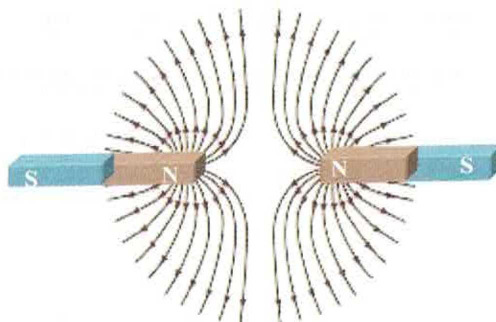


קל לראות, שהנסורת מסתדרת לפי **הקווים**, המקשרים את הקטבים ביניהם.



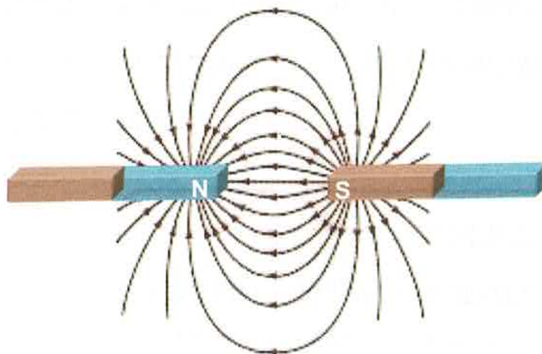
הסידור של נסורת ברזל, המתקבל ממוט מגנטי.

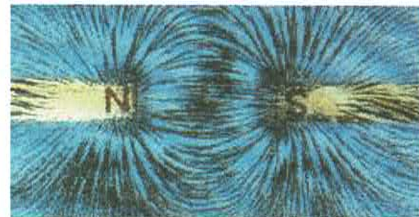
נחזור שוב על אותו ניסוי, אלא שהפעם נניח שני מוטות מגנטיים ונבדוק מצבים שונים:



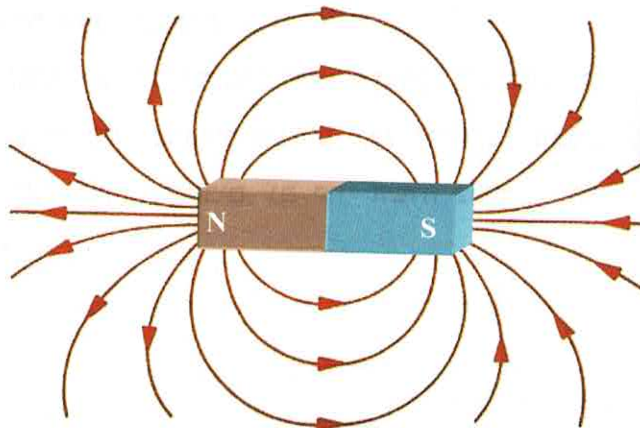
א. שני קטבים **זהים** פונים זה אל זה. הקווים שיוצאים מקוטב אחד, "דוחים" את אלה, היוצאים מהקוטב השני

ב. שני קטבים **שונים** פונים זה אל זה. במצב זה נקבל תמונה, הדומה לזאת של מגנט אחד. כלומר: גרגרי הנסורת הסתדרו לפי קווים, היוצאים מקוטב אחד, ונכנסים לקוטב שמולו.





ניסויים אלה מבוססים על כך, שלמגנט יש השפעה על גופי מתכת, המצויים בסביבתו. נסורת הברזל, שהסתדרה במעין קווים, המשחזרים את צורת השדה המיוצג על ידי קווי השדה. אולם הקווים בסרטוטים כוללים לא רק קווים, אלא גם **חיצים** המסמנים **כיוון**.



איך נדע לציין מהו כיוונו של השדה המגנטי? כבר פתרנו בעיה זו בהקשר של השדה החשמלי. התשובה לגבי השדה המגנטי דומה:



הוסכם לקבוע שכיוון קווי השדה המגנטי הוא כזה: שבכל מקום קו שדה מגנטי מצביע על הכיוון, שישפיע על הקוטב הצפוני של חץ מגנטי, שיוצב במקום זה.

כפי שכבר עשינו במקרה של השפעת הכבידה ומטענים חשמליים, נתאר ונסביר את השפעת המגנט על הגופים שבסביבתו על ידי הטענה, שמגנט יוצר **שדה מגנטי** סביבו, ושדה זה הוא שמשפיע על הגופים האחרים באותו אזור. כמו באיפיון של שדה חשמלי, גם כאן חוזק השדה מתואר על ידי גודל מיוחד: **עוצמת השדה המגנטי**. בדומה לעוצמת השדה החשמלי:

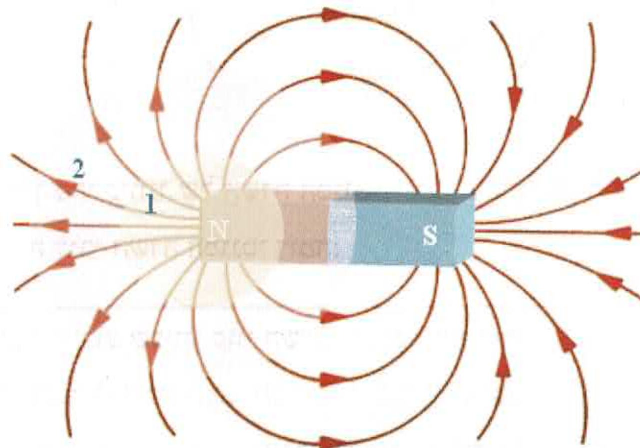
עוצמת השדה המגנטי במקום מסוים היא
הכוח הפועל על "יחידת קוטב מגנטי", הממוקמת באותו מקום.


ניקולה טסלה
1943 - 1856

גם בתיאור השדה המגנטי עוצמת השדה מתבטאת בצפיפות הקווים: **כשקווי שדה צפופים יותר, עוצמת השדה המגנטי חזקה יותר**. עוצמת השדה המגנטי נמדדת ביחידות המכונות טסלה [Tesla] לכבוד המדען אמריקאי הנודע ניקולה טסלה, שחקר את המגנטיות בתחילת המאה העשרים.

טענה זו מתאימה לכל דגמי השדה שהצגנו, ואותם ניתן להמחיש על ידי פיזור נסורת ברזל בסביבת מגנטים. קל לראות, שעוצמת השדה גבוהה יותר באזור הקטבים. גם קווי השדה צפופים יותר בסמוך לקטבים.

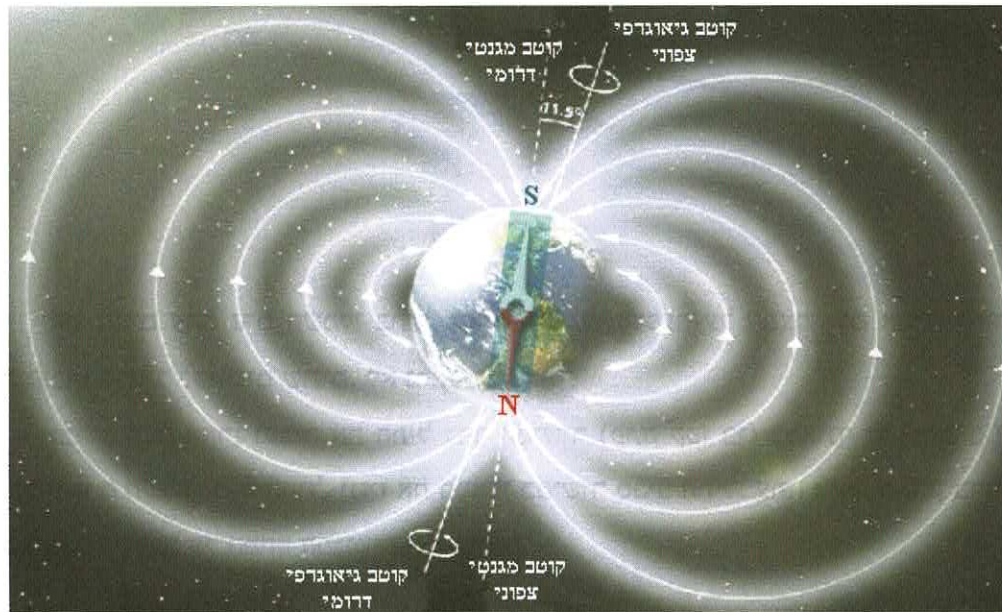
עוצמת השדה המגנטי באזור 1 חזקה יותר מאשר באזור 2




ויליאם גילברט
1544 -1603

פעילות המצפן מעידה על העובדה החשובה: כדור הארץ יוצר שדה מגנטי סביבו. הפיסיקאי האנגלי **ויליאם גילברט** היה הראשון, שחקר באופן מדעי מעמיק את מגנטיות כדור הארץ. כבר בשנת 1600 טען גילברט בספרו "המגנט", שכדור הארץ כולו הוא גוש חומר מגנטי, וזו הסיבה שהמחט המגנטית שבמצפן סוטה לכיוון הצפון. הוא אפילו הכין מודל של כדור ארץ מחומר מגנטי כדי להמחיש ולהדגים את הטענה ואת אופן פעולת המצפן.

בהתאם לדיון הקודם, קטבים מגנטיים **הפוכים** נמשכים זה אל זה. אי לכך, את המשיכה צפונה של הקוטב **הצפוני** של המצפן יש לפרש כקיומו של הקוטב **המגנטי הדרומי** דווקא **בצפון הגיאוגרפי** (!). בהתאם, הקוטב הגיאוגרפי **הדרומי** של כדור הארץ נמצא בסמוך לקוטב **המגנטי הצפוני**. (עיין בסרטוט).



תיאור שדה מגנטי של כדור הארץ. קטבים מגנטיים אינם מתלכדים עם הקטבים הגיאוגרפיים, והפוכים להם בשמות.

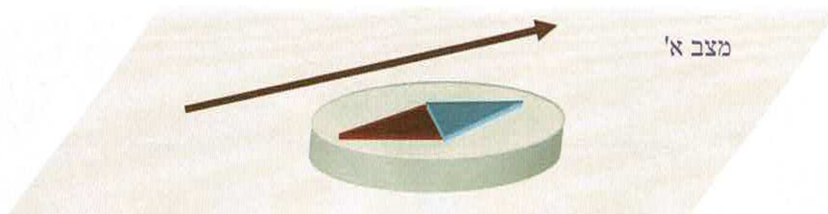


האנס כריסטיאן אורסטד 1851 - 1777

עד עכשיו היו תיאורי השדה המגנטי והשדה החשמלי מאוד דומים. ציינו רק הבדל אחד: את התכונה ה"מוזרה" ביותר של המגנט, שככל שחילקנו אותו תמיד קיבלנו מגנט שלם בחזרה, כלומר בעל זוג קטבים. כאן נסביר את הסיבה לכך, כפי שהובנה על ידי אמפר במאה ה- 19.

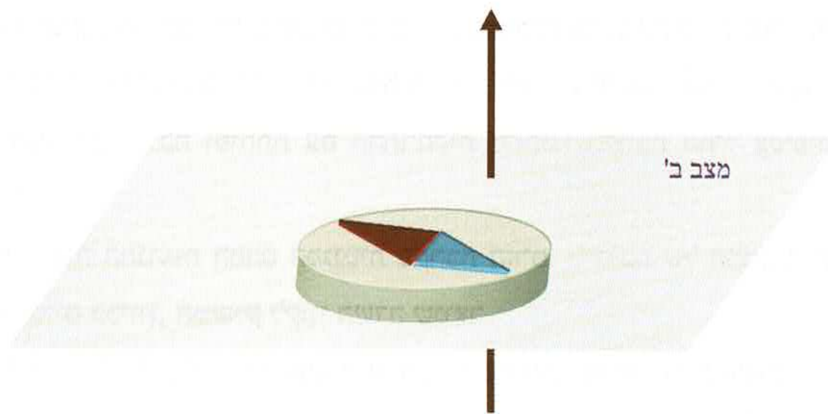
העובדה שמחט מגנטית מושפעת על ידי מגנט אחר הייתה ידועה אלפי שנים. אך רק בשנת 1820, באופן מקרי, תוך כדי הרצאה, גילה המדען הדני האנס כריסטיאן אורסטד, שאפשר להשפיע על המצפן גם בעזרת זרם חשמלי. אורסטד מצא, שמחט מגנטית סוטה מכיוונה צפון-דרום, כאשר היא בסביבת חוט הנושא זרם.

נבדוק גם אנחנו תופעה זו: לשם כך ניקח תיל ארוך ומצפן. בשלב ראשון נניח את התיל על השולחן ובכיוון המצפן (מצב א').

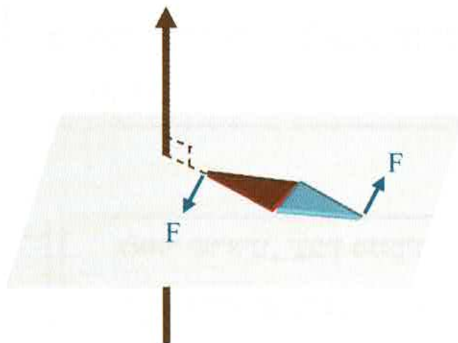


אם נזרים עתה זרם חשמלי בתיל, לא נראה כל השפעה על המצפן. גם אם נזיז את המצפן במישור לכיוונים שונים, לא נראה כל שינוי.

נבדוק מצב אחר: נעביר את התיל דרך המישור (פתח קטן בו) במאונך לו (מצב ב'). נזרים זרם חשמלי דרך התיל, ונזיז את המצפן במישור סביב התיל. עתה נראה באופן ברור מאוד, שהשפעה על המחט המגנטית אכן קיימת.



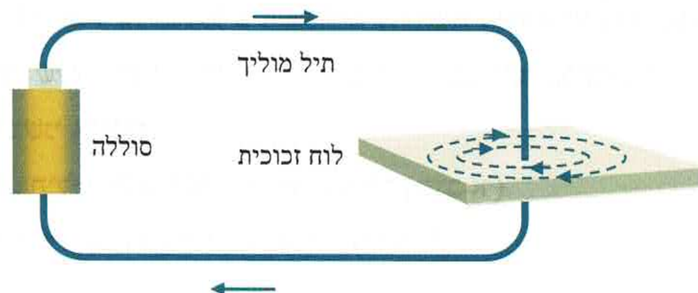
כדי להבין יותר את "כוונותיו" של הכוח המוזר, ננסה להניח את המצפן, כאשר המחט מצביעה אל התיל החשמלי. נראה, כי המחט המגנטית מיד תסתובב ותחזור למצב, אותו ראינו קודם במצב ב', במאונך לתיל. ניתן להסביר התנהגות זו, אם נניח, שעל כל קוטב של המחט פועל כוח במאונך לתיל ובכיוונים נגדיים (עין בסרטוט).



נסכם את אופן ההשפעה של הזרם על מחט מגנטית:

א. הזרם החשמלי מפעיל על מחט המצפן כוח במישור המאונך לזרם.
ב. הזרם החשמלי מפעיל על מחט המצפן זוג כוחות במאונך לתיל.

עתה, לאחר שראינו כיצד זרם חשמלי משפיע על מגנט, נבדוק בעזרת נסורת ברזל (כפי שעשינו קודם לכן) את האזור שמסביב לתיל נושא זרם. לשם כך נחבר תיל מוליך לסוללה, ונעביר אותו דרך לוח זכוכית או קרטון, שעליו נפזר את נסורת הברזל (ראה סרטוט).



נראה, שהנסורת תסתדר בדגם מאוד ברור: עיגולים סביב התיל. תוצאה זאת מעידה על כך, שסביב התיל נושא הזרם נוצר שדה מגנטי. קווי השדה הם מעגלים, שמרכזם בציר התיל, וצפיפותם הולכת ופוחתת עם ההתרחקות מהתיל: בקרבת התיל צפיפות הקווים גדולה יותר.

עתה מובנת התנהגות המחט המגנטית בקרבת הזרם: סיבובה של המחט נגרם על ידי כוחות מגנטיים בכיוון, **המשיק** לקווי השדה שנוצר.

קל להיוודע לשני כללים התקפים לגבי השדה המגנטי, שנוצר מזרם חשמלי:

א. ככל שנגביר את עוצמת הזרם החשמלי בתיל, תגדל עוצמת השדה המגנטי בכל מקום סביב התיל.

ב. ככל שנתרחק מתיל שעוצמת הזרם בו קבועה, עוצמת השדה המגנטי תלך ותקטן.

לאחר שראינו, שבין מגנטים פועלים כוחות, ואחר כך למדנו, כי גם בין זרם חשמלי ומגנט פועלים כוחות...

...ניתן להרחיב ולהכיר מצב נוסף של כוחות, הפועלים מרחוק, הפעם בין **זרמים חשמליים**.





הכוח בין זרמים חשמליים

נבצע ניסוי פשוט: נבנה שני מעגלים חשמליים (לולאות בצורת מלבן כמתואר בסרטוט), ונעמיד אותם כך, ששני צידי הלולאות הסמוכים יהיו מקבילים וקרובים זה לזה. נזרים זרם בשני המעגלים בשני אופנים:

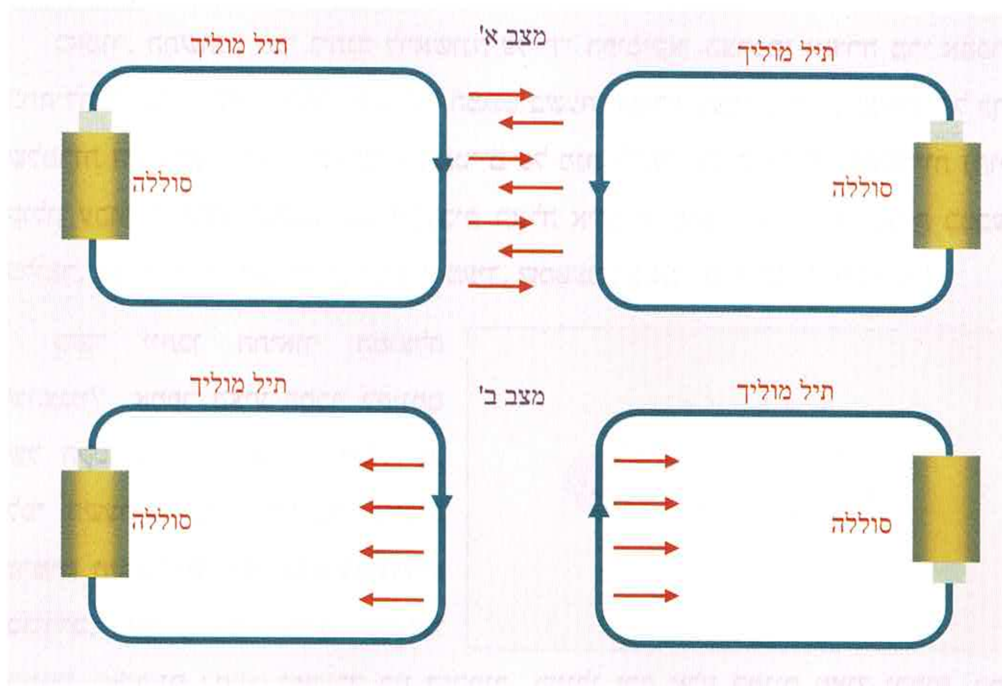
א. הזרמים בתילים הסמוכים יהיו באותו כיוון (מצב א').

ב. הזרמים בתילים יהיו בכיוונים הפוכים (מצב ב').

נוכל לראות ש:

במצב א', כאשר הזרמים היו באותו הכיוון, התילים משכו זה את זה.

וב**מצב ב'**, כאשר הזרמים היו בכיוונים מנוגדים, התילים דחו זה את זה.



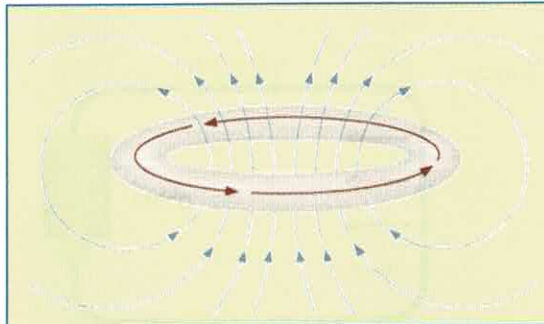
ניסוי זה מעיד על קיום כוחות, הפועלים בין זרמים **בניצב** לכיוון הזרמים. לאחר שראינו, שזרם חשמלי מהווה מקור לשדה מגנטי, ניתן לנחש, שתוצאות הניסוי, שביצענו, מצביעות על כך, שהשדה המגנטי מפעיל כוח על הזרם החשמלי.

שדה מגנטי משפיע לא רק על מגנטים, אלא גם על זרמים חשמליים.

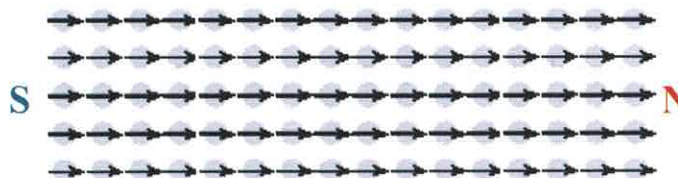
כלומר, כאשר אנו צופים בתילים נושאי זרם, המושכים או דוחים זה את זה, אנו צופים בפעולת גומלין מגנטית! יצרנו מגנטיות "ללא" מגנטים.

לסיכום נשאל שוב את השאלה, ששאלנו בתחילה, כאשר ציינו את העובדה המוזרה שכאשר שוברים מוט מגנטי נוצרים שני מגטים שלמים, אם כי, כמובן, קצרים יותר. **כיצד קורה שבשבירת מגנט נוצר זוג נוסף של קטבים?**

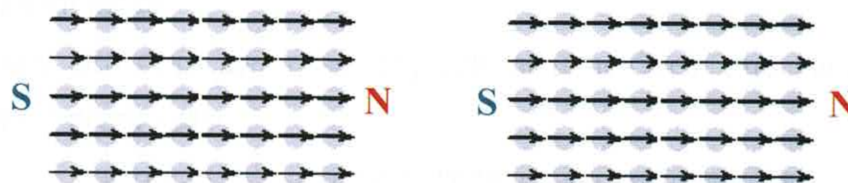
כאמור, התשובה לכך ניתנה לראשונה על ידי הפיסיקאי הצרפתי אנדרה מרי אמפר, בתחילת המאה ה- 19. התנהגות זו של המגנט בשעת שבירה מצביעה חד משמעית על כך, שלמרות השימוש המוצלח בקטבים מגנטיים על מנת לתאר את התופעות המגנטיות (חוק קולון עבור הקטבים המגנטיים), הקטבים האלה אינם קיימים כישויות עצמאיות בטבע, כלומר, כמו מטענים חשמליים. הניסיון מעיד, שמטענים מגנטיים אינם קיימים כלל!



כיצד ייתכן התיאור המוצלח שהצגנו? אמפר הציע הסבר לקיומם של הקטבים ללא מטענים מבודדים. לפי השערתו, בתוך החומר קיימים **זרמים חשמליים, הזורמים במעגלים סגורים**, בדיוק כמו אלה שראינו בניסוי, שהדגים דחייה ומשיכה בין הזרמים. מעגלי זרם אלה קטנים מאוד ורבים, כמו שרבים הם החלקיקים, היוצרים את החומר. בחומרים רגילים הזרמים בתוך החומר אינם מסודרים, ואז השפעתם מתקזזת. לא כך במגנטים הטבעיים, בהם הזרמים הקטנים מסודרים, וכך הם מחזקים את התוצאה: שדה מגנטי חזק, אותו אנו יכולים לגלות מחוץ למגנט. סידור הזרמים הפנימיים גורם להיווצרות קטבים מגנטיים בלי מטענים מגנטיים.

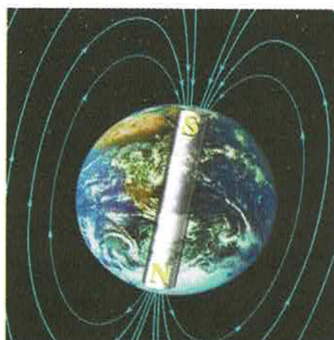


ברור אם כן, שאם נחתוך מוט מגנטי באמצע, אין אנו משנים את הסידור הפנימי של הזרמים הקטנים, ולכן בשני הקצוות של כל אחד מן החלקים יישארו קטבים מגנטיים באותה מגמה שהייתה למגנט הגדול, לפני החיתוך.



איך נמשכים חומרים כגון ברזל אל המגנט הטבעי? גם על כך נוכל לענות במסגרת ההשערה של אמפר. כתוצאה מהשפעת המגנט הטבעי על חומרים כמו ברזל, מסתדרים הזרמים הקטנים, וגוש ברזל, שלא היה ממוגנט קודם, הופך להיות מגנט בעצמו, כאילו המשך של המגנט המתקרב. עתה נוצרת משיכה בין הקטבים המנוגדים של המגנט לבין גוש הברזל הממוגנט. כלומר, אין משהו מיוחד במשיכה בין מגנט וברזל מלבד השפעה בין זרמים חשמליים.

מעגלי זרם פנימיים קיימים בכל החומרים, אבל לפעמים, מסיבות ייחודיות לאותו החומר, אין אפשרות למגנטים הפנימיים להסתדר בהתאם לשדה המגנטי החיצוני. כאלה הם חומרים כמו עץ, פלסטיק וכד'. אנו מכנים אותם בשם **"חומרים לא מגנטיים"**. חומרים, בהם מסודרים הזרמים הקטנים כבר בדרך הטבע, מכנים בשם **"מגנטים טבעיים"**, והם אלה שנתגלו ראשונים. חומרים אחרים, בהם יש יכולת לסדר את הזרמים הטבעיים בעזרת השפעה חיצונית (בדרך כלל מתכות שונות), מכנים בשם **"חומרים מגנטיים"**.



לאור ההבנה, שזרם חשמלי הוא המקור להיווצרות שדה מגנטי, ניתן לשאול את השאלה: מה, בסופו של דבר, גורם לשדה המגנטי של כדור הארץ? האם זה חומר מגנטי בתוך כדור הארץ, כפי שחשב גילברט, או זרמים של מטענים חשמליים בתוך כדור הארץ, כפי שחשב אמפר? כיום המדענים נוטים לקבל את התשובה של אמפר: זרמים פנימיים של מטענים חשמליים בתוך כדור הארץ גורמים לשדה המגנטי שלו. עם הזמן הזרמים משתנים, ובהתאם זזים הקטבים המגנטיים ומשנים את כיוון השדה בתקופות גיאולוגיות שונות. כיום הקוטב המגנטי שבצפון הגיאוגרפי נמצא ליד גרינלנד וקנדה.

סיכום הכוח המגנטי

1. המגנט פונה לכיוון צפון דרום, וניתן לנצל תכונה זו לצורכי ניווט באמצעות מכשיר הנקרא מצפן.

2. בין שני קטבים זהים של מגנטים קיימת דחייה. בין שני קטבים שונים של מגנטים קיימת משיכה.

3. חוק קולון לקטבים מגנטיים: $F = K'\frac{p_1 \cdot p_2}{R^2}$ כאשר $K' = 10^{-7}\ \frac{\text{ניוטון}}{\text{אמפר} \cdot \text{בריבוע}}$

4. למגנט ישנה השפעה, באזור, שבו הוא נמצא. עובדה זו מכנים בשם היווצרות שדה מגנטי. עוצמת השדה המגנטי במקום מסוים מתארת את הכוח, שיפעל על יחידת קוטב מגנטי, הממוקמת באותו המקום.

5. ניתן לתאר את השדה המגנטי בצורה חזותית בעזרת קווי שדה, שכיוונם מהקוטב הצפוני לקוטב הדרומי (מחוץ למגנט). ככל שקווי השדה צפופים יותר, עוצמת השדה המגנטי חזקה יותר.

6. ניתן לראות את כדור הארץ כמגנט טבעי, שהשדה הנוצר על ידו זהה לזה של מוט מגנטי. הקוטב הדרומי המגנטי של כדור הארץ נמצא קרוב לקוטב הגיאוגרפי הצפוני.

7. זרם חשמלי בתיל יוצר שדה מגנטי. הקווים, המתארים את השדה המגנטי של תיל נושא זרם, מתפשטים במעגלים, שמרכזם בציר התיל.

8. עוצמת השדה המגנטי של תיל נושא זרם נמצאת ביחס ישר לזרם וביחס הפוך למרחק מהתיל.

9. מטענים נעים, זרמים חשמליים, מהווים את המקור לכוחות המגנטיים.

10. השפעה של זרם חשמלי על קוטב המגנט היא בכיוון המאונך לתיל נושא זרם ולקו המקשר בין הקוטב והתיל.

11. בין שני תילים מקבילים, שזורם בהם זרם באותו הכיוון, קיימת משיכה מגנטית. בין שני תילים מקבילים, שזורם בהם זרם בכיוון מנוגד קיימת דחייה מגנטית.

12. השדה המגנטי של מגנטים טבעיים נוצר אף הוא על ידי מטענים, הנעים בתוך המגנט בצורת טבעות זרם.

13. השפעה הדדית בין שני מגנטים, הקרובים זה לזה, נוצרת עקב השפעה מגנטית הדדית בין טבעות הזרם שבתוך כל אחד מהמגנטים.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1) למגנט כוח משיכה חזק ביותר:

א. במרכזו.

ב. באזור שני הקטבים שלו.

ג. באזור הקוטב הצפוני שלו.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

2) בין שני קטבים מגנטיים ישנה השפעה הדדית הנמצאת:

א. ביחס ישר לריבוע המרחק ביניהם.

ב. ביחס ישר למרחק ביניהם.

ג. ביחס הפוך למרחק ביניהם.

ד. ביחס הפוך לריבוע המרחק ביניהם.

3) כאשר מחלקים מגנט לשני חלקים מקבלים:

א. מגנט אחד בעל קוטב צפוני ומגנט שני בעל קוטב דרומי.

ב. שני חלקים, שאיבדו את תכונת המגנטיות שהייתה להם.

ג. שני מגנטים, כל אחד בעל שני קטבים.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

4) מחברים שני מוטות מגנטיים זהים, כמתואר בסרטוט. האם נכון ש:

א. נקבל מוט מגנטי בעל כוח משיכה גדול מזה של מוט יחיד?

ב. נקבל מוט מגנטי, שבו תתבטלנה השפעות הקטבים?

ג. לא ניתן לדעת את תכונותיו של המוט החדש שיתקבל?

ד. כל התשובות אינן נכונות?



5) שדה מגנטי נוצר על ידי מטענים:

א. הנמצאים במנוחה.

ב. הנמצאים בתנועה.

ג. גם על ידי מטענים במנוחה וגם על ידי מטענים בתנועה.

ד. מטענים חיוביים בלבד.

6) עוצמת השדה המגנטי בנקודה מסוימת:

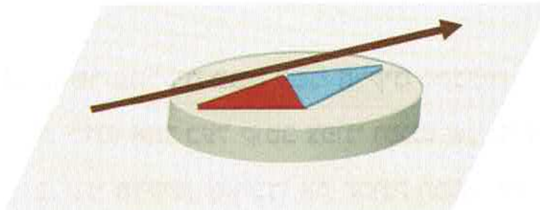
א. מתארת את ההשפעה על הגוף המגנטי, הנמצא באותה נקודה.

ב. מבטאת את הכוח, שיפעל על יחידת קוטב, שתוצב בנקודה.

ג. מתוארת על ידי צפיפות קווי השדה באותה נקודה.

ד. כל התשובות נכונות.

7) תיל מוליך זרם נמצא מעל מחט של מצפן. סטיית מחט המצפן לא תשתנה, אם:



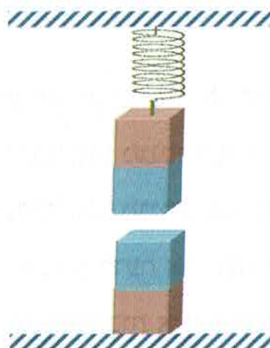
א. נרחיק את התיל מהמצפן.

ב. נגדיל את הזרם בתיל.

ג. נקטין את הזרם בתיל.

ד. נקטין את הזרם בתיל, ובאותה המידה נקרב את התיל למצפן.

8) מגנט תלוי על קפיץ, המחובר לתקרה. על הרצפה מונח מגנט,שני. אם נרחיק את המגנט, שמונח על הרצפה, התארכות הקפיץ:



א. תקטן.

ב. תגדל.

ג. לא תשתנה.

ד. תהיה שווה לאפס.



הכוח המגנטי

1. אילו שתי תכונות עיקריות מאפיינות מגנטים?

2. היכן נמצא הקוטב המגנטי הצפוני של כדור הארץ?

3. מהו המקור לכוחות המגנטיים?

4. באילו גדלים תלויה עוצמת המשיכה או הדחייה בין שני קטבים מגנטיים?

5. מהי עוצמת השדה המגנטי בנקודה מסוימת? כיצד ניתן לתאר אותה ולדעת את עוצמתה?

6. תיל נושא זרם חשמלי מוחזק מעל מצפן. כיצד תשתנה מידת הסטייה של המחט המגנטית:

   א. כאשר נקרב את התיל למצפן מבלי לשנות את הזרם?

   ב. כאשר נשאיר את התיל מעל למצפן ונשנה את עוצמת הזרם?

7. מהו מגנט טבעי? מהו ההבדל בין מגנט טבעי לבין, חומרים שאינם מגנטיים?

8. באיזה אזור של המגנט עוצמת השדה המגנטי היא החזקה ביותר, ובאיזה אזור היא החלשָה ביותר?

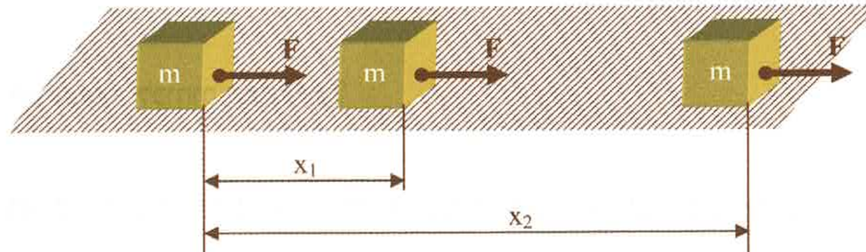
9. נתונים שני מוטות ברזל ארוכים, שרק אחד מהם ממוגנט. כיצד ניתן לזהות מי משניהם הוא הממוגנט, ללא שימוש במכשירים או במתקנים נוספים?

10. מהו ההבדל העיקרי בין מגנטים לבין מטענים חשמליים?

שינוי מצב התנועה בהשפעת כוח

כאמור בחוקי הכוח משתנה מצב התנועה בעקבות השפעת הגופים, או בשפת הפיזיקה, בהשפעת הכוחות. נביא מספר דוגמאות, בהן נוכל להתרשם מאופן ההשפעה:

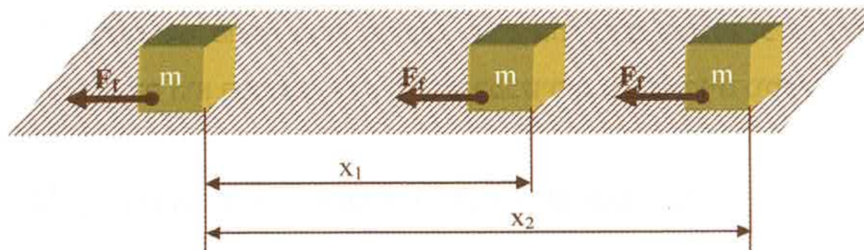
הדגמה מס' 1



גוף m מונח על מישור אופקי חלק. ברגע מסוים הופעל על הגוף כוח F בעל גודל קבוע, וכיוונו- במקביל למישור המשטח. בעקבות פעולת הכוח ישנה הגוף את מצב תנועתו (כלומר מהירותו). אם יפעל כוח F במשך פרקי זמנים שונים: t_1, t_2, ייגרמו לגוף שינויי תנועה שונים, ובהתאם יעבור הגוף את המרחקים השונים: x_1, x_2, וכך הלאה (אנו מסמנים מרחק ב-x על מנת להדגיש את העובדה, שהתנועה אינה משנה את כיוונה, וכיוון זה מסומן באות x). כלומר: אותו כוח גרם למהירויות שונות, כאשר הוא פועל לאורך מרחקים שונים.

הדגמה מס' 2

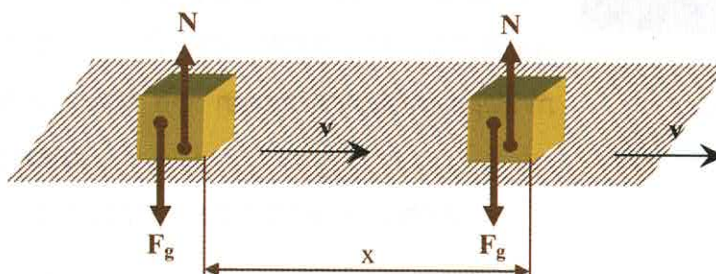
גוף m, המונח על המישור אופקי מחוספס, מקבל דחיפה לאורך המישור. עקב הדחיפה מתחיל הגוף לנוע לאורך המישור, מאט את תנועתו ובסופו של דבר נעצר. שינוי זה בתנועה (ההאטה) מתרחש בעקבות פעולת כוח חיכוך מצד המישור המחוספס. כידוע, כוח החיכוך עם המישור פועל בכיוון המקביל למשטח, וכיוון הכוח מנוגד לכיוון תנועת הגוף (וזהו ההבדל מהדוגמה הקודמת).



גם כאן, כמו בהדגמה הקודמת, בהשפעתו של כוח החיכוך משתנה מצב תנועתו של הגוף, הכוח מאט אותו. שינוי זה יהיה בכיוון הכוח. בעקבות דחיפות בעוצמה שונה יעבור הגוף בכל פעם מרחקים שונים, בטרם ייעצר. כלומר, כוח החיכוך, שהשפיע לאורך מרחקים שונים, גרם לשינויי תנועה שונים, כאשר הוא פעל לאורך מרחקים שונים.

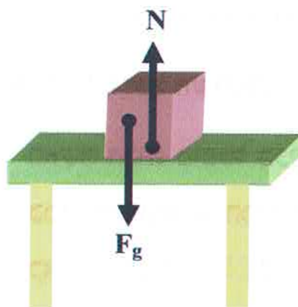
הדגמה מס' 3

גוף m נע על פני מישור אופקי חלק. משום כך לא פועל על הגוף שום כוח אופקי, ובהתאם לחוקי הכוח, לא ייגרם לגוף שינוי בתנועתו לאורך המישור. נשים לב גם לכך, שלאורך כל הדרך פעלו על הגוף גם כוח הכובד F_g וגם כוח התגובה האלסטי N (הכוח הנורמלי), אך לא השפיעו על תנועתו האופקית של הגוף. שני הכוחות איזנו זה את זה.



הדגמה מס' 4

גוף מונח על שולחן. כידוע, על הגוף פועלים שני כוחות: כוח הכובד F_g וגם כוח הנורמלי N. כמו במקרה הקודם, אין שינוי במצב התנועה של הגוף.



מתוך ארבע הדוגמאות, שהוצגו, ניתן להסיק ש:

כאשר מופעל כוח לאורך תנועתו של הגוף, מתרחש שינוי במצב תנועתו, הגוף משנה את מהירותו.
שינוי זה נמצא ביחס ישר לאורך המרחק, שבו פועל הכוח.

לאור הדוגמאות נוכל להבין את הצורך בהגדרת מושג פיזיקאלי מיוחד, המאפיין את התהליך שתיארנו. נגדיר גודל **עבודה**, המתאר את פעולת הכוח על הגוף לאורך מרחק מסוים.

עבודה של כוח שווה למכפלת גודל הכוח שבכיוון התנועה במרחק שעובר הגוף.



ג'יימס פרסקוט ג'ול
1889 - 1818

או באופן מתמטי:

$$W = F \cdot x$$

W - העבודה (Work) שנעשתה על הגוף (ביחידות ג'ול).

F - הכוח המופעל על הגוף (נמדד ביחידות ניוטון).

x - המרחק שעבר הגוף בזמן השפעתו של הכוח (ביחידות מטר).

העבודה נמדדת, כאמור, בג'ול. שם היחידה ניתן לכבוד המדען האנגלי מהמאה ה- 19, אשר חקר תופעות פיזיקאליות הקשורות לעבודה, לאנרגיה ולחום.

מתוך הנוסחה של ההגדרה ברור, שהמשמעות של היחידה:

1 ג'ול היא,העבודה, שנעשית על ידי יחידת כוח, 1 ניוטון, הפועל לאורך יחידת מרחק, 1 מטר.

נציין מספר נקודות חשובות

א. כאשר הכוח מופעל בכיוון תנועת הגוף (הדגמה מס' 1), עבודתו נחשבת חיובית. במקרה שהוא גם הכוח היחיד, הפועל בכיוון זה, תגדל מהירותו של הגוף.

ב. כאשר כוח מופעל נגד כיוון התנועה של הגוף (הדגמה מס' 2), עבודתו נחשבת שלילית. במקרה שהוא גם הכוח היחיד הפועל בכיוון זה, יאט הגוף את תנועתו.

ג. כאשר כוח מופעל במאונך לכיוון התנועה של הגוף (הדגמה מס' 3), עבודתו של הכוח נחשבת לאפס. במקרה שהוא גם הכוח היחיד הפועל על הגוף, לא ישתנה גודל מהירותו של הגוף, אך הוא ישנה את כיוון תנועתו.

ד. כאשר כוח מופעל על גוף, אבל הוא ממשיך להישאר במנוחה (הדגמה מס' 4), עבודתו של הכוח נחשבת כאפס.

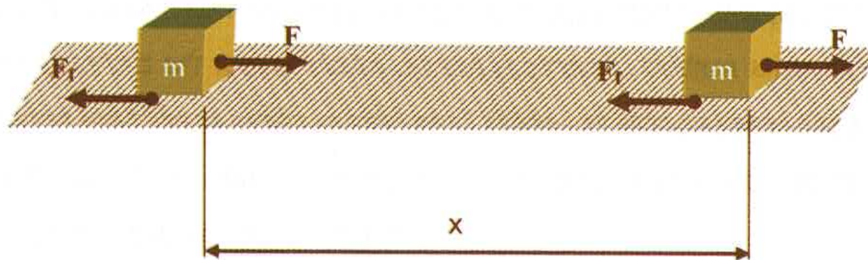
במקרה, שפועלים על גוף מספר כוחות, נשארת בתוקף הגדרת העבודה לגבי כל אחד ואחד מהכוחות בנפרד. העבודה הכללית של כל הכוחות היא הסכום האלגברי של העבודות, שנעשו על ידי כל אחד מהכוחות, וזאת משום שכך מתחברים גם הכוחות.

לדוגמא: כאשר מופעלים על גוף שני כוחות אופקיים בכיוונים מנוגדים (גרירה וחיכוך למשל), תהיה העבודה של שניהם יחד ניתנת ע"י ביטוי:

$$W = (F - F_f) \cdot x = F \cdot x - F_f \cdot x$$

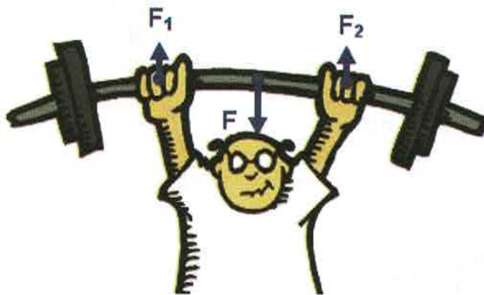
ובהתאם:

$$W = W_F - W_f$$



אנו רואים שלגבי העבודות מתקיים **העיקרון של הסופרפוזיציה,** כלומר חיבור אלגברי פשוט.

הדגמה מס' 5



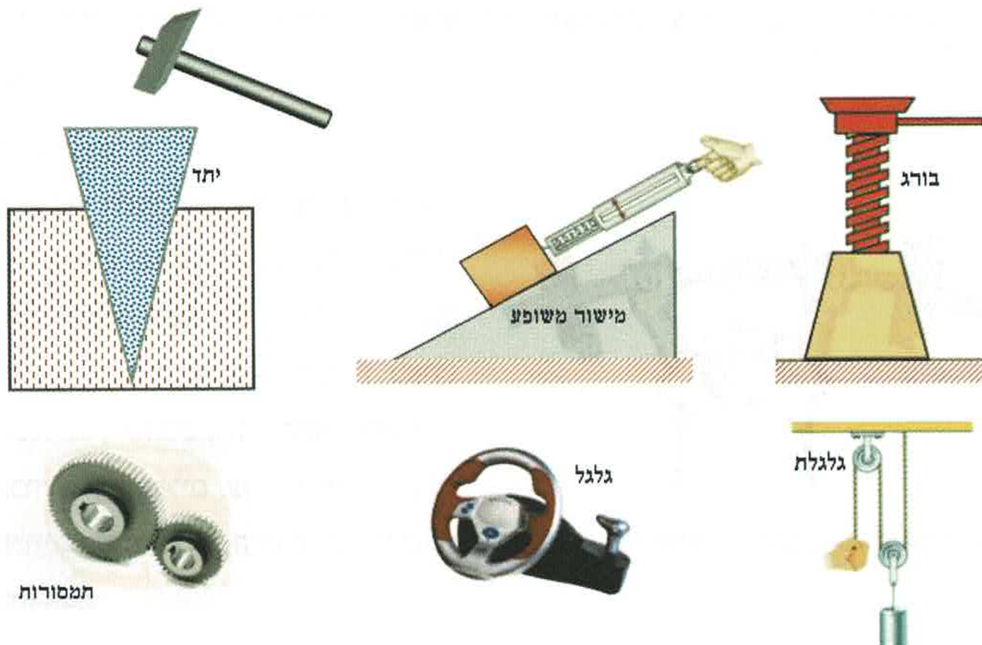
נביא עוד דוגמה שלכאורה אינה מסתדרת עם ההבנה שלנו את המושג עבודה. אדם מחזיק בשתי ידיו משקולת מעל ראשו. למרות שהאדם מתאמץ מאוד, נדמה לנו, שהמשקולת נמצאת במנוחה. הכוחות המופעלים על המשקולת אינם מלווים בשינוי במצב התנועה של המשקולת, ובהתאם גודל העבודה, המחושב לפי הנוסחה, הוא אפס.

במובן היום-יומי המושג עבודה משקף את מידת השקעת המאמץ מצידינו בביצוע עבודה. האם אנו טועים במשהו?

מתברר, שאי התאמה זו, שתיארנו, אינה קיימת למעשה. נסתכל היטב במרים המשקולות ונבחין ברעידות השרירים המתמדת שלו. למעשה המצב הוא, שבכל רגע ורגע המשקולת יורדת במקצת ושוב מתרוממת. אם נחשב את עבודתו של הכוח המופעל על הידיים של מרים המשקולות, נקבל, שגודל העבודה המתבצעת בהחלט לא מבוטל. לכן האיש המחזיק משקולת בגובה, אכן מבצע עבודה (שקשה לחשב את גודלה כמובן), ואם המשקולת נתמכת, על ידי עמודים למשל, העמודים אינם מבצעים עבודה, כפי שנובע מן הנוסחה. זהו המקרה בהדגמה מס' 4.

מכונות פשוטות לביצוע עבודה

לבסוף נציין בהקשר לעבודה שמאז תחילת ההיסטוריה של האנושות (מלפני אלפי שנים, הרבה לפני שנוסדה הפיזיקה) חיפש האדם דרכים לבצע עבודה בהשקעת כוח קטנה. כתוצאה מחיפושים אלו הומצאו מכונות פשוטות ומפורסמות, שמלוות אותנו בחיי היום-יום: מנופים מסוגי שונים, מישור משופע, בורג, גלגלת. כל אלה מאפשרים לבצע עבודה, ומקנים יתרונות שונים ומגוונים. כך למשל, כל הגוף שלנו מהווה למעשה מכונה לביצוע עבודות שונות, הקשורות לתנועה והפעלת כוח.
בנושא זה נדון בהרחבה בפרק הבא.



ע ב ו ד ה

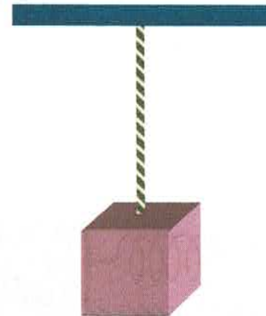


ציינו עבור כל אחד מהמקרים שלהן:

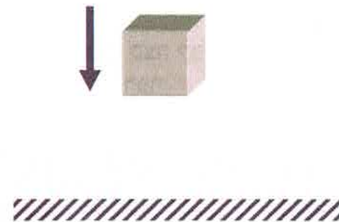
א. האם מתבצעת עבודה, ואם כן – מה סימנה ?

ב. מהו הכוח, הגורם לעשיית העבודה, ומהו כיוונו (שמאלה, ימינה, מעלה או מטה)?

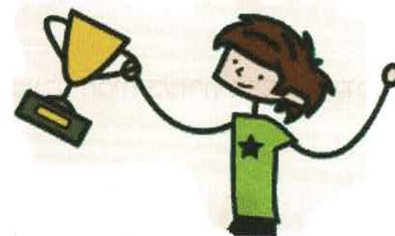
1. משקולת תלויה על חוט.



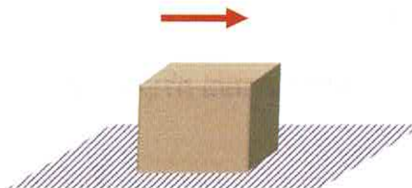
2. גוף נופל למטה.



3. אדם מחזיק גביע.



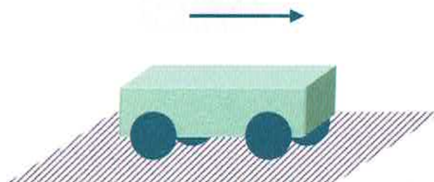
4. גוף נע על משטח חלק.



5. חץ, שנורה מקשת ונע כלפי מעלה.



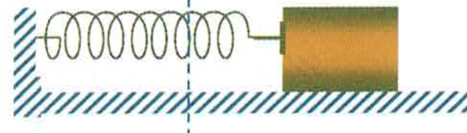
6. עגלה נעה על משטח לא חלק.



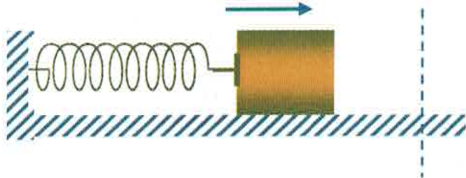
7. אישה מתאמצת לדחוף שמאלה: א. מכונית שנעה. ב. מכונית שאינה נעה.



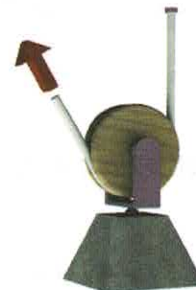
8. מסה, הקשורה לקפיץ אופקי נעה ימינה.



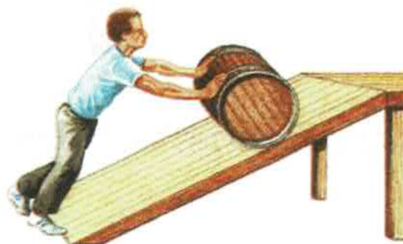
9. מסה, שכיווצה קפיץ אופקי, נעה בכיוון ימין.



10. אישה מרימה משקולת בעזרת גלגלת



11. אדם מעלה חבית בעזרת מישור משופע



למדנו, שהשפעה בין הגופים היא תמיד הדדית. נשאלת השאלה: כאשר מתבצעת עבודה של כוח על גוף מסוים, מה קורה עם הגוף השני, המפעיל את הכוח?

כפי שפירטנו, הניסיון מראה, שבעקבות ביצוע עבודה נגרמים שינויים לגוף, שעליו הופעל הכוח, והגוף משנה את מצב תנועתו. ברור שאם פעולת הכוחות מתרחשת בזוגות, יפעל הכוח גם על הגוף השני, וייתכן שגם הוא ישנה את מצב תנועתו. אך אין זו התוצאה היחידה האפשרית כתוצאה מהפעלת הכוח. ביצוע עבודה יכול להתלוות גם בשינויי צורה של הגוף, התחממות שלו, או בתהליכים כימיים, חשמליים, גרעיניים ואחרים, הנגרמים על ידי הכוח.

הפיזיקאים גילו, שניתן למצוא את מידת השינויים המתרחשים בעקבות פעולתם של כוחות. מידה זו מבטאת את השינויים הנ"ל באמצעות גודל אחד, הקובע את שינוי במצב הגוף מכל הבחינות, ומכונה בשם הכולל: **אנרגיה**.

כלומר, לאחר שראינו שעבודה של כוח גורמת לשינוי מצב התנועה שלו, ניתן לשער, שבאופן כללי ניתן גם לטעון, שעבודה של כוח כלשהו גורמת לשינוי במצב הגוף, אותו אנו מכנים בשם שינוי באנרגיה. בהתאם לסוגי השינויים, הנגרמים על ידי הכוחות, המבצעים את העבודה, וסוגי שינויים המתרחשים בגופים, קיבלה האנרגיה שמות שונים. נזכיר כאן מספר **סוגים של אנרגיה**, ונתאר אותם בקצרה. בהמשך נפרט חלק מהם.

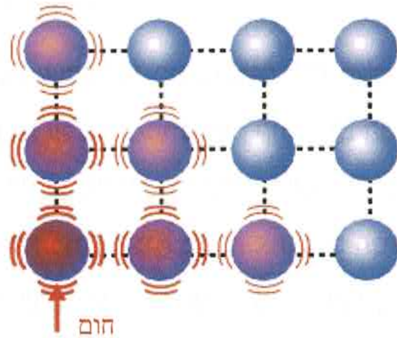
> **אנרגיה** היא אפיון מצב הגוף (או הגופים),
> המשתנה עקב עבודה של כוחות עליו (או עליהם)

הנפוצים ביותר מבין סוגי האנרגיות הם:

1. **אנרגיה קינטית** (אנרגיה של תנועה). אנרגיה זו מתארת את מצב התנועה של גוף, המשתנה בעקבות הפעלת כוח עליו, כוח הגורם לשינוי בגודל מהירותו.

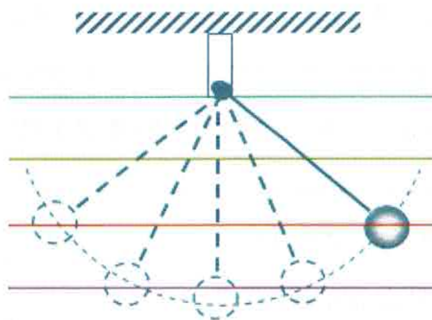


2. **אנרגיה פנימית של גוף.** כאשר גופים מתחככים זה בזה נעשית עבודה. בנוסף לשינוי בתנועה של הגוף, הוא מתחמם, והטמפרטורה שלו עולה. אנו רואים בזה עדות לכך, שהמצב הפנימי של הגוף השתנה, ומתארים שינוי זה כשינוי **באנרגיה פנימית** E_{int}.

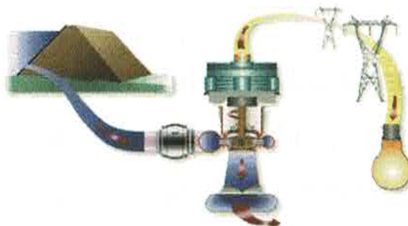


לפעמים, מכנים אנרגיה זו בשם אנרגית "חום", או פשוט "חום". אך אין זה מדויק. בפיזיקה נהוג לכנות את מעבר האנרגיה בעקבות מגע בין גוף חם לגוף קר בשם "מעבר חום" (ללא עבודה של כוח כפי שנראה לנו). בעקבות מעבר זה של חום יכולה להתרחש גם התחממות של הגוף המהווה עדות לשינוי באנרגיה הפנימית, אך אין זה בהכרח כך. יכולים להתרחש גם תהליכים אחרים, כגון, שינויים במצב הצבירה של הגוף, שבהמשך נמחיש אותם יותר.

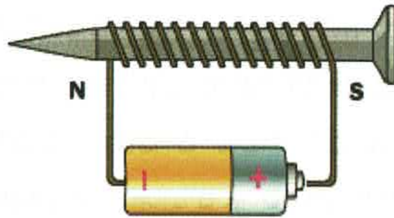
3. **אנרגיה גרביטציונית כובדית.** אנרגיה זו מתארת את השינוי במיקום ההדדי של שני גופים, הנמשכים זה כלפי זה עקב משיכת הכבידה.



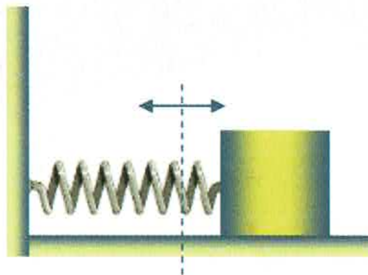
4. **אנרגיה חשמלית.** אנרגיה זו מתארת שינוי במצבם ההדדי של שני גופים, טעונים במטען חשמלי, הנמשכים זה לקראת זה (או נדחים זה מפני זה) עקב השפעה בין המטענים.



5. **אנרגיה מגנטית.** כפי שראינו, מגנטים וחומרים מגנטיים דוחים ומושכים זה את זה, וכך משנים את מצב התנועה של הגופים. מכאן אנו מסיקים על קיום אנרגיה, הקשורה עם המגנטים. מתברר, שסוג זה של אנרגיה קשור קשר מהותי עם האנרגיה החשמלית. למעשה, שניהם מהווים סוג אחד של אנרגיה: אנרגיה אלקטרומגנטית.



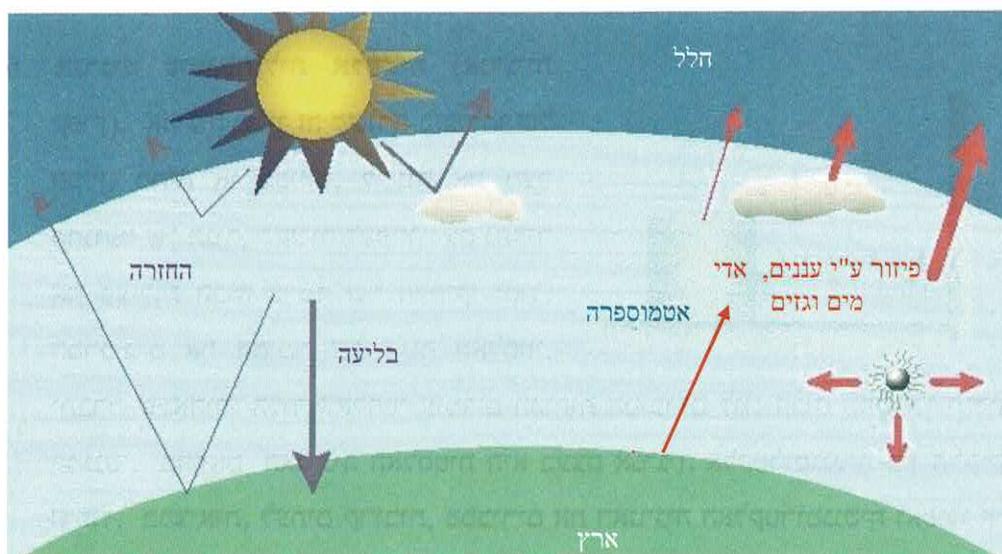
6. **אנרגיה פוטנציאלית אלסטית** (אנרגיית קפיץ). אנרגיה מסוג זה קשורה ביכולתו של קפיץ, מתוח או מכווץ, לשנות את מצב התנועה של הגוף, הקשור לקפיץ. אם נחקור את פעילות הכוח ברמה של חלקיקי יסוד, המרכיבים את החומר של הגוף האלסטי, יתברר שמאחורי הכוח האלסטי עומדים הכוחות המוכרים לנו: הכוח החשמלי והכוח המגנטי. בהתאם, האנרגיה האלסטית היא בעצם אנרגיה אלקטרומגנטית בין חלקיקי היסוד. במציאות, לעתים קרובות, מסבירים את האנרגיה האלקטרומגנטית ואפילו את האנרגיה הכובדית על ידי השוואה לקפיץ מדומה, אליו קשורים מטענים וגופים.



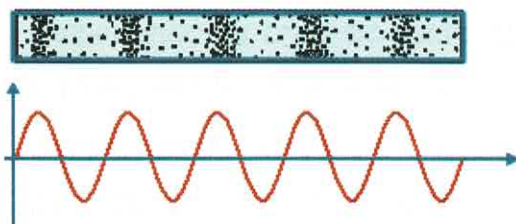
7. **אנרגיה כימית.** התוצאות של תגובות כימיות, המתרחשות במגע בין חומרים שונים, הן עדות לסוג זה של אנרגיה . כתוצאה מתהליכים ברמה של אטומים ומולקולות משתנים החומרים, ויכולים להתרחש שינויים כגון: התחממות ואף פיצוץ או שריפה. אנרגיה כימית, הקשורה לתהליכים אלו, היא למעשה אנרגיה אלקטרומגנטית, הקשורה במטעני החלקיקים, המרכיבים את החומרים. כאשר מתרחשת תגובה כימית, מתרחש שינוי במצב החומרים, כפי שנדרש בהגדרת האנרגיה.



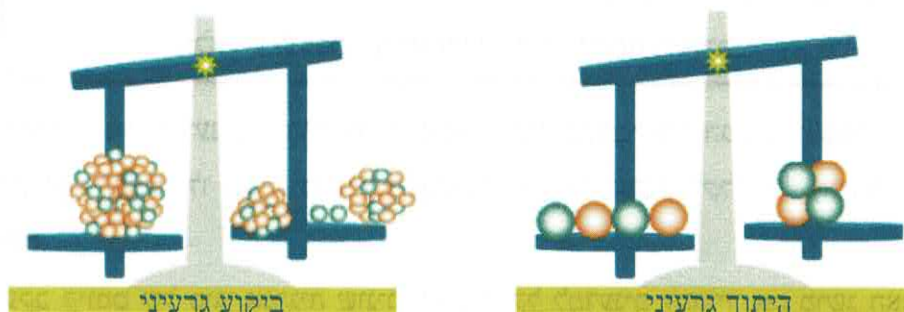
8. **אנרגיית קרינה.** על קיום אנרגיה זו מסיקים מקיום שינויים בגופים, שאינם נמצאים במגע עם גוף אחר. קרינה יכולה להיות מסוגים שונים: חלקיקים ושדות. בכל מקרה, אנו לא רואים את הקרינה, אך אנו עדים לשינויים, בגופים החשופים לה, שבעקבות כך, מתחממים ועוברים שינויי מצב שונים. קרינה אלקטרומגנטית מלווה את השינוי במצבם של האטומים או של המולקולות, המרכיבים את החומר. קרינה אלקטרומגנטית נישאת על ידי חלקיק מיוחד, הנקרא פוטון. מקור קרינה החשוב ביותר עבורנו היא קרינת השמש – מקור החימום של כדור הארץ.



9. **אנרגיית קול.** על אנרגיה מסוג זה מצביעה העובדה, שיצירת הקול קשורה לתנועה של גופים: מיתר, עמוד אוויר, גלי מים. למעשה, אנרגית הקול היא אנרגיית תנודות של חלקיקי תווך מסוים, בעל תכונות אלסטיות (אוויר, מתכת, מים וכו'). ההשפעה בין החלקיקים מתפשטת כגל קול בתוך החומר.



10. **אנרגיה גרעינית.** אנרגיה זו מעידה על עצמה על ידי קרינה מסוגים שונים, יציאת חום ואנרגיה קינטית של חלקיקי היסוד מתוך חומרים מסוימים. מקור האנרגיה הגרעינית הוא הפעולה ההדדית בין החלקיקים, המרכיבים את גרעיני האטומים (פרוטונים ונויטרונים). שינויים במצבם בתוך הגרעין מלווים בשחרור אנרגיות גדולות מסוגים שונים, שהוזכרו. מקרה קיצוני של שחרור אנרגיה בכמות גדולה תוך זמן קצר (פיצוץ) מתרחש בפצצות אטום. תהליך של שחרור אנרגיה גרעינית יכול להיות גם מבוקר, כמו זה המתרחש בכורים אטומים. השמש היא דוגמא לכור אטומי טבעי.



חשוב להבין:

אנרגיה אינה חומר ואינה דבר גשמי, אלא אפיון מצב של גופים, של חומר או של קרינה. לכן, את כל הביטויים אודות אנרגיה "זורמת","נזרקת", "פוגעת" צריך לקבל במובן התיאורי בלבד.



הגדרת האנרגיה

לאחר שסקרנו סוגים אפשריים של אנרגיה (וישנם נוספים), נציין שוב את מה שמייחד את כל צורות האנרגיה. ניתן להסביר ניסויים רבים באופן כמותי ובמדויק אם נשתמש בתיאור התהליכים בעזרת המעברים של אנרגיה מסוג אחד לסוג אחר. מעברים אלה ידועים בשם **"גלגולי אנרגיה"**. לשם כך ניתן להגדיר ביטויים מתמטיים עבור כל אחד מסוגי האנרגיה. על גלגולי אנרגיה מדברים כהמרה בין סוגי האנרגיה השונים. הכמות הכללית של האנרגיה במעברים האלה נשמרת. כך אנו מגיעים ל**חוק שימור האנרגיה**, הנקבע תחילה באופן ניסיוני:

כמות האנרגיה הכוללת נשארת קבועה: אנרגיה אינה נעלמת ואינה נוצרת, אלא רק הופכת מצורה אחת שלה לצורתה האחרת.

בתחילה ניסו מדענים לזהות את ה"משהו" הזה שעובר בין הגופים ונשמר, כחומר מיוחד, ואף העניקו לו שמות כגון: "פלוגיסטון" (חומר האש), "קלוריק" (חומר החום) ואחרים.

עקב קיומם של סוגי אנרגיה שונים לא היה קל למדענים להגדיר את מושג האנרגיה באופן כללי. כל סוגי האנרגיה חשובים במידה שווה, אך בחיי היום-יום אין אנו נתקלים בכולם באותה מידה.

למרת הריבוי בסוגי האנרגיה אנו מכירים רק שלוש דרכים, בהן היא מועברת:

עבודה – כאשר כוח מסוים מבצע עבודה על גוף כלשהו.

חום – כאשר אנרגיה פנימית עוברת מגוף חם לגוף קר במגע בין הגופים.

קרינה – כאשר מעבר האנרגיה בין הגופים מתבצע ללא מגע באמצעות קרינה מסוג כלשהו.

לכן, ניתן גם להגדיר את האנרגיה כאפיון מצב הגוף, אשר משתנה באחת משלוש הדרכים: עבודה, חום וקרינה. ניתן, כמובן, לראות מצב זה בכיוון ההפוך, ולכנות את האנרגיה כתכונת הישות הפיזיקאלית:

אנרגיה היא תכונת הישות הפיזיקאלית, המאפשרת לבצע עבודה, לגרום למעבר חום או לקרינה.

מקובל לסמן אנרגיה באות E (Energy). עקב הגדרת האנרגיה ברור, שגודל זה נמדד באותן יחידות כמו עבודה, חום או קרינה. יחידת האנרגיה, המקובלת במערכת היחידות הבינלאומית, היא **ג'ול**.

כפי שרואים מתיאור סוגי האנרגיה השונים, הכוללים גם חום וקרינה, אין אפשרות להסתפק בהגדרת האנרגיה כיכולת לבצע עבודה, כפי שנהוג בספרי פיסיקה אחדים. הגדרה זו היא פשטנית ומוגבלת בתקיפותה, זאת משום שבין התכונות המרכזיות של האנרגיה נמצאת יכולת ההמרה מסוג אחד לסוג אחר. אולם כפי שידוע מהניסיון ומוסבר על ידי תורת החום (תרמודינמיקה), המרה מלאה בין אנרגיה פנימית לעבודה אינה אפשרית. לכן, בהגדרה, אין להסתפק בעבודה כדרך העברת האנרגיה היחידה,אלא יש להוסיף גם את החום, ולמען האמת, גם את הקרינה.

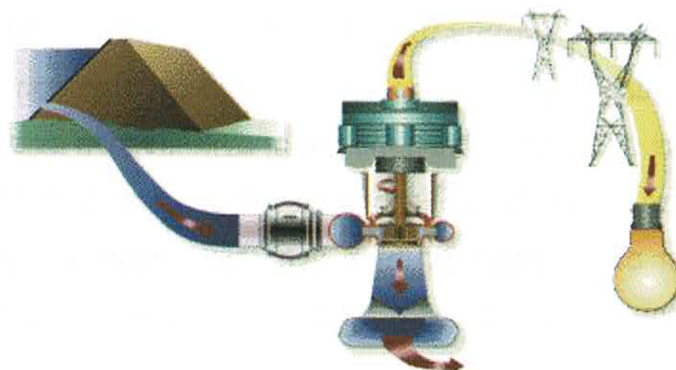
דוגמה של גלגולי אנרגיה

הדוגמא המפורסמת הממחישה את המרת האנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת היא תיאור הנפילה של גוף. מצד אחד ניתן לתאר את התהליך כפעולת כוח המשיכה בין הגוף ובין כדור הארץ. עקב כך משתנה מצב התנועה של הגוף (המהירות שלו עולה). אך מצד שני ניתן לתאר את אותה תופעה ללא כוח, אלא לשים את הדגש על האנרגיה. הגוף נופל, ונפילתו מלווה במעבר בין אנרגיה כובדית, כאשר הוא נמצא בגובה מסוים מעל פני כדור הארץ, לאנרגיה קינטית. המעבר נראה כך, **כאילו** הייתה "בתוך הגוף" יכולת סמויה לגרום לתנועה, והיא מקבלת מימוש תוך כדי הנפילה. הדבר מתבטא בעלייה של האנרגיה הקינטית, המלווה בנפילתו של הגוף. בהתאם לתפיסה זו, קיבלה אנרגית הכובד (מותנית במרחק שבין הגופים, המושכים זה את זה) את הכינוי **אנרגיה פוטנציאלית**. בסוף הירידה כול האנרגיה, הקשורה לקיום הגובה מעל הרצפה, עוברת המרה לאנרגיה קינטית (רגע אחד לפני המגע עם הקרקע). אולם זה אינו סוף התהליך. בהתנגשות עם הקרקע הופכת כל האנרגיה הקינטית, עקב התנגשות עם הקרקע, לאנרגיה פנימית של הגוף והאדמה. לאחר מכן, הגוף, שהתחמם, הופך להיות מקור חום לסביבה. חום זה מתפשט לתוך הקרקע עד שישתוו הטמפרטורות של הכדור והסביבה. הסרטוט מתאר את המצבים שתוארו.





כאשר עוקבים אחר המתרחש בטבע, ניתן להבחין בתהליכים, המתאימים לתיאור אנרגיה "המתגלגלת", כלומר, עוברת מצורה אחת לצורה אחרת.



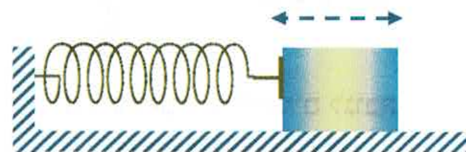
המרת אנרגיית הגובה של מים לאנרגיה חשמלית



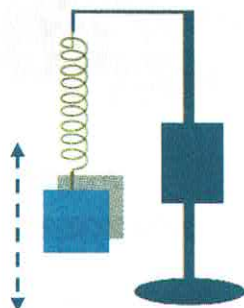
גלגולי אנרגיה

בהמשך נביא דוגמאות של תופעות, המלוות בשלבים רבים של המרת אנרגיה מצורה לצורה. על סמך הנאמר תארו את המתרחש בכל מקרה מבחינת ההמרה בין הסוגים השונים של אנרגיה.

1. גוף מונח על משטח אופקי וקשור אל קיר באמצעות קפיץ. מותחים את הקפיץ ומשחררים אותו. הגוף מתחיל בתנודות.



2. גוף תלוי על קפיץ. מותחים את הקפיץ ומשחררים אותו. הגוף מתחיל בתנודות.



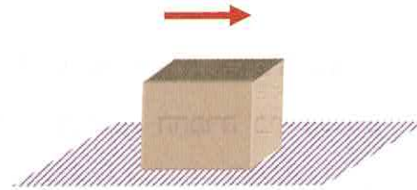
3. כדור נבעט כלפי מעלה.



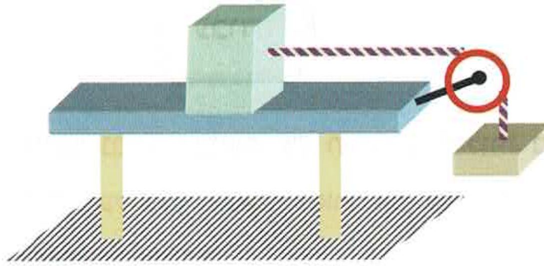
4. טיל משוגר ממתקן השיגור.



5. גוף נע על משטח לא חלק



6. משקולת יורדת גורמת לתנועה במערכת.



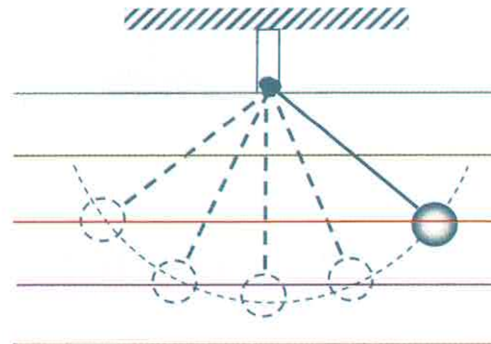
7. פגז נורה מתותח.



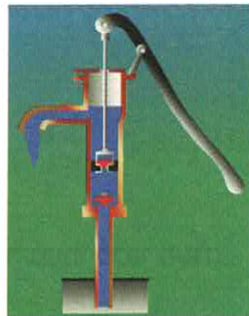
8. אדם מתחיל לרוץ.



9. מטוטלת מתנדנדת.



10. משאבה מעלה מים לגובה.



11. אדם מרים משקולת



12 . נורה דולקת במעגל חשמלי.



סיכום הפרק

1. עבודה היא גודל, המאפיין פעולת כוח, שבעקבותיה משתנה מצבו של הגוף.
2. העבודה מוגדרת כמכפלה של הכוח, הפועל בכיוון תנועת הגוף במרחק שהגוף עבר בזמן פעולת הכוח. הביטוי המתמטי עבור עבודה הוא: $W = F \cdot x$

   W - העבודה (Work) (נמדדת ביחידות ג'ול).

   F - הכוח המופעל על הגוף (נמדד ביחידות ניוטון).

   x - המרחק שעבר הגוף בזמן השפעתו של הכוח (נמדד במטרים).
3. העבודה נמדדת ביחידות ג'ול. 1 ג'ול הוא העבודה, הנעשית על ידי כוח של 1 ניוטון, שפעל לאורך מרחק של 1 מטר. הכוח פועל בכיוון תנועתו של הגוף, או כנגדו.
4. כאשר כוח מופעל בכיוון התנועה של הגוף, עבודתו של הכוח נחשבת חיובית.

   כאשר כוח מופעל נגד כיוון התנועה של הגוף, עבודתו של הכוח נחשבת שלילית.

   כאשר כוח מופעל במאונך לכיוון התנועה של הגוף, עבודה אינה מתבצעת.

   גם כאשר פועל כוח, אבל הגוף נמצא במנוחה, אין מתבצעת עבודה.
5. אנרגיה היא אפיון מצב גוף או מספר גופים, המשתנה עקב ביצוע עבודה, מעבר חום או קרינה.
6. עקב קיום אינטראקציות מסוגים שונים, מגדירים אנרגיות מסוגים שונים. עקב השפעה הדדית בין גופים (פעילות כוחות), אנרגיה משנה את צורותיה.
7. עבודת כוח, חום וקרינה הם דרכי מעבר האנרגיה מגוף לגוף ושינוי צורת האנרגיה.
8. אנרגיה אינה חומר ואינה דבר גשמי, אלא אפיון מצב הישות.
9. בכל התהליכים הפיסיקליים מתבצעת העברת אנרגיה מצורתה האחת לצורתה האחרת בכמויות שקולות, כך שהכמות הכללית של האנרגיה נשמרת. תכונה זו היא חוק שימור האנרגיה.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1. עבודה מהווה מדד:

א. לכוח שמופעל.

ב. למרחק שגוף עובר.

ג. למאמץ המושקע.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

2. אנרגיה פנימית היא:

א. אנרגיית חום.

ב. אנרגיית תנועה.

ג. אנרגיית תנועה ואנרגיה פוטנציאלית.

ד. כל התשובות נכונות.

3. כאשר גוף נע כלפי מעלה, כוח הכובד:

א. מבצע עבודה שסימנה חיובי.

ב. מבצע עבודה שסימנה שלילי.

ג. פועל חזק יותר מאשר בזמן נפילה.

ד. אינו מבצע עבודה.

4. העבודה, שמבצע כוח מסוים, יכולה להיות:

א. חיובית, כאשר הכוח פועל בכיוון תנועת הגוף.

ב. שלילית, כאשר הכוח פועל בכיוון הפוך לכיוון תנועת הגוף.

ג. שווה לאפס, כאשר אין תזוזה.

ד. כל התשובות נכונות.

5. כאשר גוף נע מבלי לשנות את תנועתו, ניתן להסיק בוודאות ש:

א. לא פועלים עליו כוחות.

ב. הכוחות הפועלים עליו הם לא בכיוון תנועת הגוף.

ג. עבודת הכוחות, הפועלים עליו, שווה לאפס.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

6. עבודה שווה ל:

א. אנרגיה.

ב. שינוי באנרגיה.

ג. כוח.

ד. מהירות.

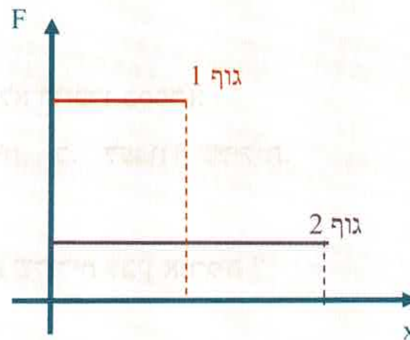
7. הגרף הבא מתאר פעולה של כוחות, שהופעלו על שני גופים שונים, כפונקציה של מרחק. (בתחילת פעולת הכוחות היו הגופים במנוחה). העבודה שבוצעה על יד הכוחות הייתה:

א. גדולה יותר על גוף 1.

ב. גדולה יותר על גוף 2.

ג. שווה בשניהם.

ד. לא ניתן לדעת, כי לא ידועת מסת הגופים.



8. אנרגיה של גוף קטנה כאשר:

א. לא פועלים עליו כוחות.

ב. לא מתבצעת עליו עבודה.

ג. מתבצעת עליו עבודה, שסימנה שלילי.

ד. כל התשובות אינן נכונות.



1. הבא שלוש דוגמאות לשימוש יום-יומי במושג עבודה.

2. ציינו, באילו תנאים כוח אינו מבצע עבודה.

3. האם עבודת כוח החיכוך היא תמיד שלילית ? אם כן, נמקו! אם לא, הבא דוגמא לכך.

4. הגדירו מהי עבודה, ומהי אנרגיה.

5. האם העבודה שווה לאנרגיה ? נמקו !

6. תנו שתי דוגמאות (שלא הוזכרו בספר):
   א. לעבודה חיובית. ב. לעבודה שלילית.

7. מהו הקשר בין עבודה שלילית לבין אנרגיה ?

8. ציינו שתי תכונות עיקריות, המאפיינות אנרגיה .

9. רוכב אופניים נוסע בכביש אופקי ישר. האם נעשית עבודה:
   א. כנגד כוח הכובד ? ב. כנגד כוח החיכוך ? הסבר !

10. מתי עלינו להשקיע יותר עבודה: כשאנו מעבירים גוף למרחק אופקי, או כשאנו מעלים למעלה את הגוף לאותו המרחק ? הסבר !



שאלות חישוב

1) כוח אופקי של 15 ניוטון פועל על גוף. חשבו את עבודת הכוח, אם הגוף עבר מרחק של:

א. 2 מטרים. ב. 40 ס"מ.

2) כוח של 10 ניוטון פועל על גוף לאורך של 2 מטרים. מהי העבודה, שהשקיע הכוח, אם הוא פועל:

א. בכיוון תנועת הגוף.

ב. במאונך לכיוון תנועת הגוף.

ג. נגד כיוון תנועת הגוף.

3) אדם משקיע עבודה של 60 ג'ול בהרמת גוף, שמסתו 2 ק"ג. לאיזה גובה הורם הגוף ?

4) ארגז, שמסתו 4 ק"ג הורם לגובה של 2 מטרים. מה צריכה להיות מסתו של ארגז אחר, כדי שבאותה כמות עבודה ניתן יהיה להרימו לגובה של 8 מטרים.

5) גנן מושך שק חול, שמסתו 50 ק"ג למרחק של 10 מטרים ומפעיל כוח של 200 ניוטון. לאחר מכן הוא מעמיד את השק על עגלה, שגובהה 1 מטר. כמה עבודה ביצע הגנן ?

6) כוח אופקי של 20 ניוטון מושך גוף, הנמצא על משטח אופקי לא חלק, למרחק של 2 מטרים. ידוע, שכוח החיכוך הקינטי שווה ל- 3 ניוטון. מהי עבודת:

א. הכוח המושך.

ב. כוח החיכוך הקינטי

ג. כוח הכובד.

ד. כוח התגובה האלסטית .

7) גוף, שמשקלו במנוחה 10 ניוטון, נע על משטח אופקי. מקדם החיכוך הקינטי בין הגוף לבין המשטח הוא 0.3. אם הגוף עבר מרחק של 4 מטרים, מהי עבודת כוח החיכוך?

8) כדי לבנות עמוד יש להרים מהקרקע 5 לבנים, ולהניח אותן זו על זו. משקלה של כל לבנה במנוחה הוא 40 ניוטון, ועובייה 5 ס"מ.

מהי כמות העבודה שיש לבצע ?

9) אדם נושא על כתפו תיק צד, שמשקלו 150 ניוטון, לאורך דרך אופקית של 100 מטר.

כמה עבודה ביצע האדם ?

האם התקבלה תשובה סבירה ? נמקו !

10) מסה של 5 ק"ג נמשכת באיטיות כלפי מעלה על יד כוח, הפועל לאורך דרך של 4 מטרים.

א. מהי עבודת הכוח ?

ב. מהי עבודת כוח הכובד ?

ג. לאיזה סוג של אנרגיה הפכה עבודת הכוח ?

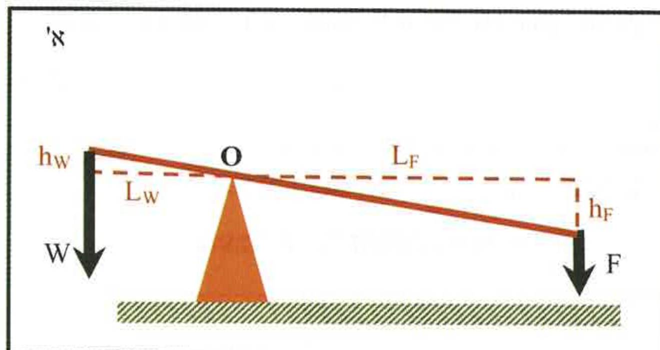
תשובות:

1) א. 30 ג'ול. ב. 6 ג'ול. **2)** א. 20 ג'ול. ב. 0. ג. 20- ג'ול. **3)** 3 מטרים

4) 1 ק"ג. **5)** 2500 ג'ול. **6)** א. 40 ג'ול. ב. 6 – ג'ול. ג. 0. ד. 0.

7) 12 – ג'ול. **8)** 20 ג'ול. **9)** 0. **10)** א. 200 ג'ול. ב. 200- ג'ול.

המנוף



כאמור, המנוף היה בין המכונות הראשונות שהמציא האדם לצורך בנייה ופעילות יום-יומית.

הכרנו את עיקרון פעולתו של המנוף כמכשיר, המאפשר להפעיל אותו תוך כדי ריווח בכוח או ריווח במרחק ההפעלה של הכוח, הכול בהתאם לנסיבות ולמטרות.

קיבלנו את היחס הקובע את הפעילות של המנוף (תרשים א'):

$$W \cdot L_W = F \cdot L_F \qquad (1)$$

כאן L_F היא זרוע הכוח F. L_W היא זרוע הכוח W.

שני המצבים של מוט המנוף יוצרים זוג משולשים דומים, כאשר הצלעות הקטנות שלהם הן הדרכים, בהן פעלו שני הכוחות h_W ו-h_F. הודות לכך, המוט מתלכד עם היתר בכל אחד מן המשולשים. המשולשים דומים, וניתן לטעון לשוויון יחסים בין הצלעות המתאימות:

$$\frac{h_W}{h_F} = \frac{L_W}{L_F} \qquad (2)$$

נכתוב את יחס (1) כפרופורציה:

$$\frac{F}{W} = \frac{L_W}{L_F} \qquad (3)$$

השוואה בין ביטויים (2) ו- (3) מאפשרת לקבל:

$$\frac{F}{W} = \frac{h_W}{h_F} \qquad (4)$$

ביטוי (4) מאפשר לקבל את השוויון:

$$W \cdot h_W = F \cdot h_F \qquad (5)$$

בביטוי (5) אנו מזהים את השוויון בין העבודות, שביצעו שני הכוחות F ו-W, כלומר:

$$W_F=W_W \qquad (6)$$

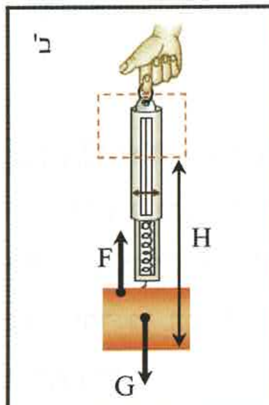
ביטוי (6), שפיתחנו, מבטא יותר מהיחס עבור מנוף. זהו כלל, התקף עבור כל מכשיר מכני:



כל מכשיר מכאני אינו גורם לשינוי בכמות **העבודה**, המתבצעת במשימה נתונה.

טענה זו מכונה ***כלל הזהב במכניקה***.

המישור המשופע

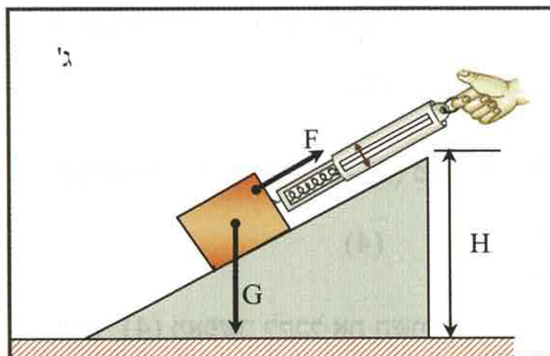


מישור משופע מהווה מכונה פשוטה, הידועה עוד מימי קדם. נניח שמשימת המטרה היא להרים משא לגובה H (תרשים ב'). לשם כך דרוש כוח F, השווה לפחות לגודל כוח הכובד G, הפועל על הגוף:

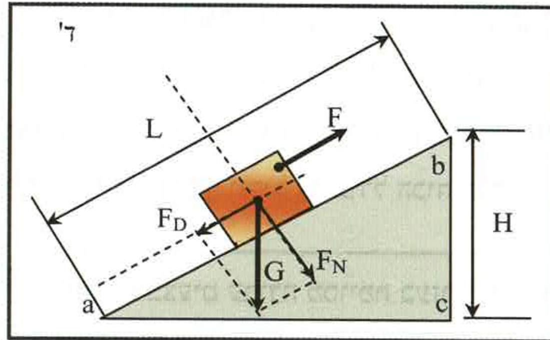
$$F = G \qquad (7)$$

אך אם נתחכם, ובמקום להרים את המשא אנו נגרור אותו לאורכו של מישור משופע לאותו גובה, נצטרך להפעיל כוח קטן יותר בגודלו. נבדוק בכמה קטן יותר.

לשם כך נדמיין גוף זה, כשהוא מונח על מישור משופע (תרשים ג').



כדי להבין את השינוי נזכיר, שכוח הוא אפיון ההשפעה בין הגופים, והשפעה זו מתרחשת בכיוון מסוים. לכן מסמנים כוח על ידי חץ. ניתן להציג השפעה בכיוון מסוים כסכום של שתי השפעות בכיוונים שונים לפי כלל המקבילית. במקרה שלנו ניתן להציג את השפעת כוח הכובד G כסכום של שני כוחות במאונך למישור המשופע, F_N, ובמקביל למישור המשופע F_D, (תרשים ד'). ברור שתוך כדי הגרירה על המדרון הופעל כוח F לפחות בגודל של F_D. לכן אנו צריכים להעריך את גודלו כדי להסיק לגבי התועלת בשימוש במישור המשופע.



נשים לב, שאת המדרון הצגנו על ידי משולש ישר זווית abc, וצלע bc שלו היא הגובה H. משולש זה דומה למשולש של פירוק כוחות, שבו הצלעות הן כוחות G ו-F_D. מדמיון זה נובע ש:

$$\frac{F_D}{G}=\frac{H}{L} \qquad (8)$$

כאן סימנו את אורך המישור המשופע ב-L. פרופורציה (8) ניתן לכתוב בצורה:

$$F_D \cdot L = G \cdot H \qquad (9)$$

ביחס זה קל לזהות שוויון של עבודת הכוח G בעלייה לגובה H ושל הכוח F_D לאורך המדרון L:

$$W_{FD}=W_G \qquad (10)$$

כלומר, קיבלנו שבגרירת גוף לאורך המדרון על ידי כוח F_D בוצעה עבודה, השווה בגודלה לעבודה, שצריך להשקיע על מנת להעלות את המשא לגובה H. תוצאה זו תואמת לכלל הזהב במכניקה.

בדיוק כמו במקרה של מנוף אנו יכולים לחשב את היתרון המכני של המישור המשופע המוגדר, כיחס בין הכוח, אותו היינו צריכים להפעיל בעליית הגוף ללא המכשיר, G, לבין כוח F_D, הנדרש לאותה משימה בשימוש במדרון:

$$\eta = \frac{G}{F_D} = \frac{L}{H} \qquad (11)$$

מתוך הפירוק של הכוח G (תרשים ד') ניתן לראות, שככל שזווית השיפוע קטנה, כך גדול יותר היתרון המכני. נציין, שהצבה של הכוח F_D כפי שמתקבל בפירוק הכוח (תרשים ד') בביטוי (11), מספק את היתרון האידיאלי, אשר תואם למצב של היעדר חיכוך. קיום החיכוך יגדיל את גודל הכוח הנדרש F_D, ובהתאם יקטין את היתרון המכני.

כאשר מבצעים עבודה מסוימת בעזרת מכשירים, הריווח בכוח מלווה בהפסד בדרך.

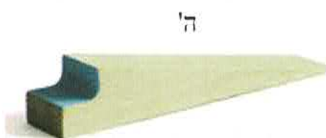
טענה זו הכירו כבר בימי קדם בשם **"כלל הזהב של המכניקה"**



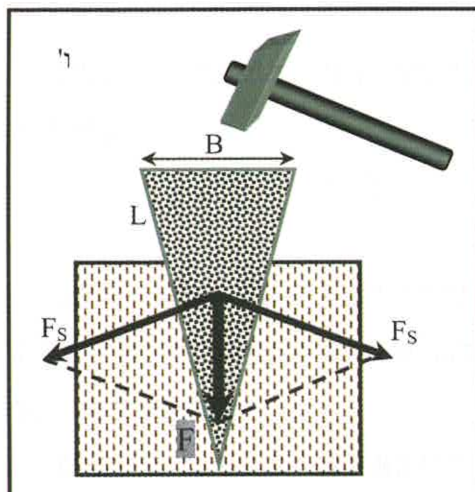
יתד (טריז)

היתד הוא מכשיר חשוב ביותר בפעילות האדם, גם הוא עתיק ביותר. בדומה לעקרון הפעולה של המישור המשופע, פעולת היחד מבוססת על פירוק הכוחות. צורתו היא משולש בעל שתי פאות ארוכות ופאה אחת קצרה (תרשים ה').

ה'



את היתד מחדירים לתוך סדק, הקיים בתוך בול עץ, למשל, ומפעילים כוח על הבסיס הקצר של היתד. הצורה המיוחדת של היתד גורמת לכך, שכאשר היא מוחדרת בתוך הגוף, שתי הפאות מפעילות על הגוף כוחות F_S גדולים בהרבה מן הכוח F (תרשים ו'). זאת משום שכיוון הכוחות F_S כמעט מאונך לכיוון המקורי של הכוח F . הכוחות F_S פועלים להרחבת הביקוע.



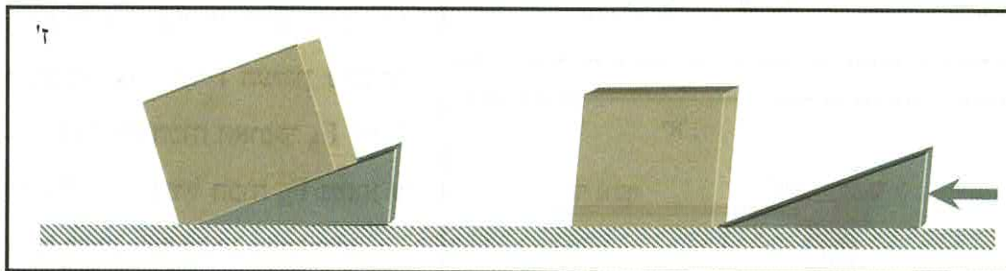
כמו במקרה של מישור משופע, הריווח בהפעלת היתד, $\eta = \frac{F_s}{F}$, מלווה בהפסד בדרך. התקדמות היתד לתוך הגוף, לאורך הפאה L, גדלה בהתאם להתרחבות בין חלקי הגוף, ביניהם מצויה היתד, B:

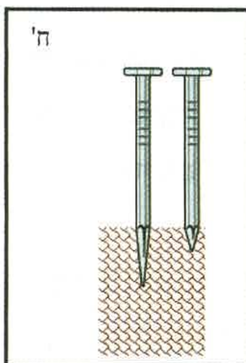
$$\eta = \frac{L}{B} = \frac{F_s}{F} \qquad (12)$$

שוויון היחסים נובע מדמיון המשולשים של היתד ופרוק הכוח F (תרשים ו'). מכאן נובע, שככל שזווית החוד של היתד קטנה יותר, היתרון המכאני עולה.

כבר בימי קדם היה נפוץ השימוש ביתד להבקעת עצים ולריסוק אבנים. היתד, או הטריז, עוזרים להרמת חפצים ולהצמדת חפצים בהידוק רב.

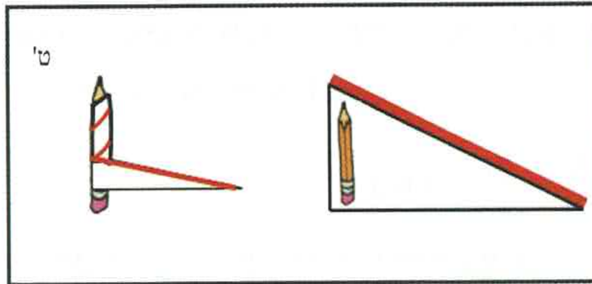
לדוגמה, כדי לעצור דלת ולמנוע סיבובה, מחדירים טריז מתחת לדלת. הטריז מפעיל כוח כלפי מעלה, על הדלת, וכלפי מטה, על הרצפה. נוצר חיכוך רב בין הטריז לבין הרצפה, והדלת נעצרת. באופן דומה הכנסת טריז בין הגוף לבין הרצפה (תרשים ז') מאפשרת להרים במקצת את החפץ הכבד, כדי שאחרי כן יתאפשר להחדיר מתחת לגוף מוט של מנוף, למשל.



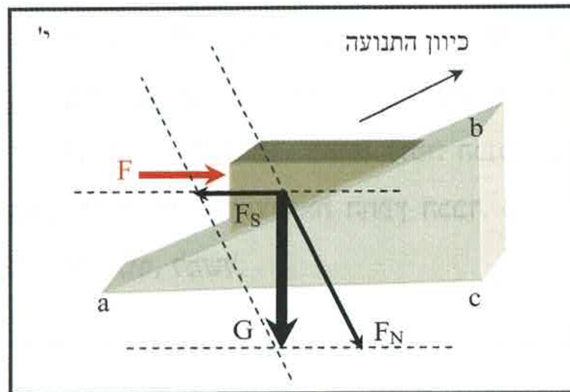


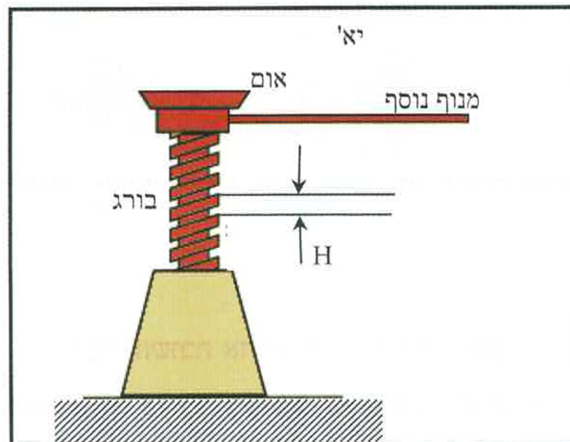
דוגמה חשובה אחרת של יתד היא **מסמר** (תרשים ח') אם כי במקרה זה מדובר בשילוב של מספר פאות, אך עיקרון הפעולה והריווח המכאני נשארים כמו במקרה של טריז פשוט.

סכינים, גרזנים, דוקרנים, מכשירי חיתוך בעלי זווית להב קטנה מאוד כולם פועלים על פי עקרון היתד, ומבוססים על יתרון מכני גדול מאוד.



הבורג הוא מכונה פשוטה, גם הוא מאפשר ריווח גדול בכוח. קו הסיבוב של הבורג ("הספירלה" או "סליל הבורג") נוצר, כאשר גזרה של מישור משופע נכרכת מסביב לגליל (תרשים ט'). מאחר והבורג הוא מישור משופע, "המקופל" באופן סלילי, ניתן להבין את עיקרון פעולתו, אם נעזרים במישור המשופע.





נדמיין שני טריזים זה על זה, כפי שמוצג בתרשים י'. את כוח הכובד המופעל על הטריז העליון נפרק עתה לרכיב, המאונך לשטח המגע בין הטריזים ab, הכוח F_N והכוח האופקי F_S. ברור, שהכוח F_N אינו גורם לתזוזה בין הטריזים. לכן, כדי להשאיר את הטריז העליון במנוחה, די לבטל את הכוח האופקי F_S על ידי כוח F. את גודל הכוח F_S נמצא על סמך דמיון משולשים מתאימים:

$$\frac{F_S}{G} = \frac{bc}{ac} \qquad (13)$$

כלומר, אם גובה הטריז התחתון קצר מבסיסו, נקבל יתרון מכני, שפירושו במקרה זה שעל ידי כוח F קטן אנו מחזיקים גוף, עליו פועל כוח כובד G ו-:

$$F < G \qquad (14)$$

סיבוב אחד של הבורג בדוגמה שלנו תואם להתקדמותו של הטריז העליון בגובה bc (H). בבורג אמיתי זוהי "פסיעה" אחת (פסיעה - הרוחק בין שני סלילים סמוכים של

הבורג – תרשים יא'). אורך הבסיס של הטריז התחתון ac ‏(L) קשור לרדיוס של הבורג R:

$$L = 2\pi \cdot R$$

מכאן ניתן לקבל ביטוי עבור היתרון המכני של הבורג:

$$\eta = \frac{G}{F} = \frac{2\pi \cdot R}{H} \qquad (15)$$



היתרון בשימוש בבורג עולה, ככל שהיקף הבורג (או הרדיוס שלו) גדול יותר לעומת אורך הפסיעה שלו. ביחס זה הכוח לאורך הבורג גדול מן הכוח, המופעל במקביל לראש הבורג, ומאזן אותו.

למעשה תרשים י' מציג פעולה של **בורג** וחלקו המשלים – **אום**, שגם הוא כולל הברגה. לעתים קרובות האום מהווה מתווך בין המשא לבין הבורג. תפקיד זה נראה היטב במכשיר המכונה **מגבה** (תרשים יא'), בו משתמשים להרמת משא כבד במיוחד.

יב'



לאור יתרון מכני זה, מכפיל הבורג את המאמץ, וחודר לתוך תווך קשה, לאחר מאמץ סביר של האדם, המסובב אותו. חשיבותו של הבורג רבה מאוד. בכל המכונות המורכבות ישנם ברגים רבים. קיום החיכוך מקשה כמובן על הברגת הבורג, אך גורם לכך, שאחרי החדירה לתוך החומר, קשה מאוד להוציא את הבורג, וכך מובטח החוזק של המבנה המתקבל.

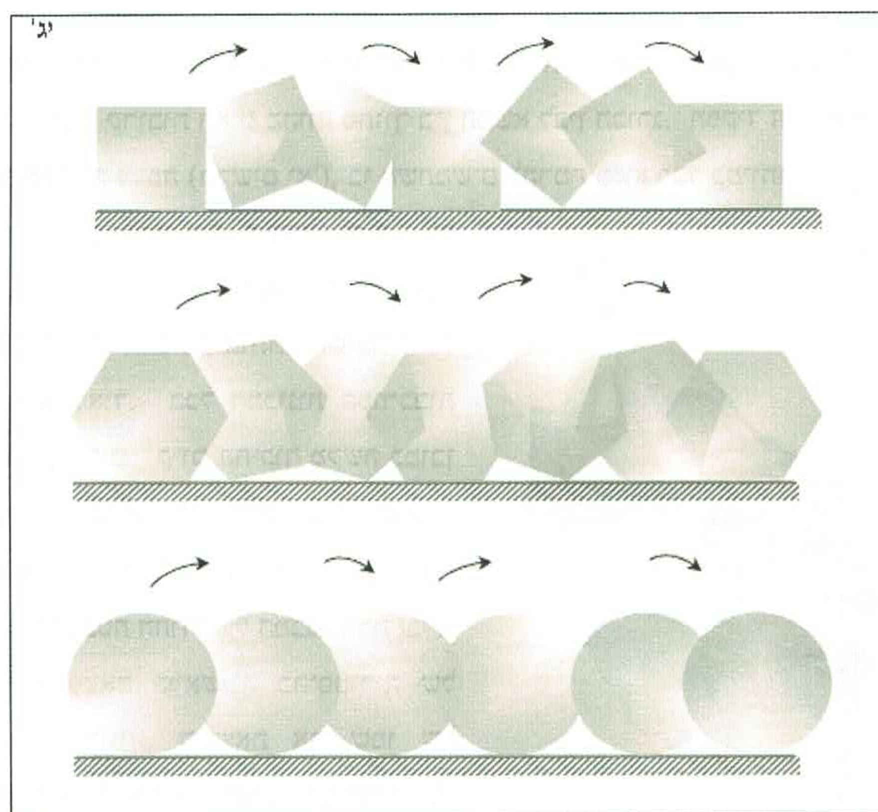
אולי ההמצאה הראשונה בהיסטוריה של המדע והטכנולוגיה, הנושאת את שמו של הממציא, היא "בורג ארכימדס" (תרשים יב') לכבוד המדען היווני, הדגול שחי במאה השלישית לפני ספירה. במכונה זו משתמשים על

מנת להעלות מים ממקום נמוך, נהר למשל. זוהי משאבת המים העתיקה ביותר, בה משתמשים גם כיום. המשאבה כוללת בורג ארוך בתוך סליל. סיבוב הבורג (הידית שבראשו) גורם למים לעלות לאורך הבורג. למעשה, המים עולים במישור המשופע של סליל הבורג, ועושים דרך ארוכה בהרבה מהפרש הגבהים בו הם עולים, אך בהתאם גם הרווח בכוח הנדרש למשימה זו.

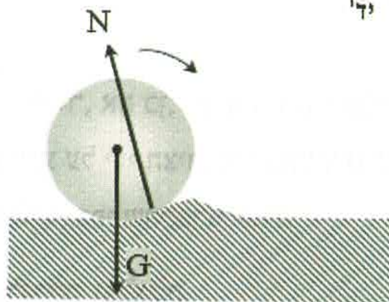
שאלה: הריווח המכאני של **הבורג** עולה על הרווח המכאני של **המסמר**. הסבירו מדוע?

גלגל וציר

משפחת המכשירים הפשוטים כוללת גם את הגלגל, המתחרה של המנוף על התואר המכשיר העתיק ביותר בהיסטוריה של האנושות. הגלגל הוא המצאתו של האדם במאבקו עם כוח החיכוך. בכל מקום, בו רוצים לגרור גוף ממקום למקום, עולה בעיית כוח החיכוך. כדי לעקוף את הבעיה מחליף האדם גרירה בגלגול.



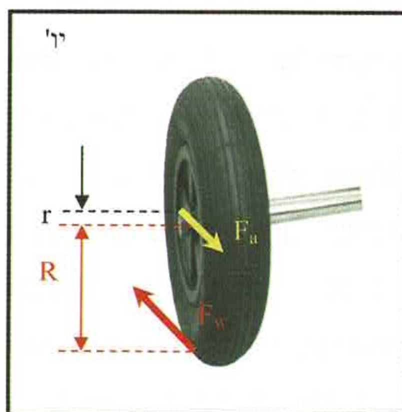
מהר מאוד למד האדם, שלגלגל גוף בעל פינות לא נוח (תרשים יג'), וקל יותר לגלגל גוף בעל צורה עגולה. כך בוטל חיכוך הגרירה. ואכן,לכל בעל ניסיון ידוע, שלגלגל נוח יותר מאשר לגרור. אך גם פעולה זו דורשת מאמץ מתמיד, כלומר, קיים כוח חיכוך אחר, **חיכוך הגלגול**. את מקורו ניתן להבין, אם נזכור, שעקב משקלו של כל גוף, המצוי על משטח כלשהו, מתרחשת התעקמות של המשטח (תרשים יד').



בעקבות התעקמות זו תגובתו של המשטח N למשקלו של הגוף אינה עוברת דרך מרכז הכובד, אלא פועלת בנטוי. כפי שרואים, מומנט של הכוח N נוטה לעצור את גלגול הגוף. זהו המקור לחיכוך הגלגול.



הגלגל הוא מכונה פשוטה, הממירה את כוח החיכוך הקינטי לכוח חיכוך של גלגול. כך מושג רווח בכוח, שיכול לתמוך בתנועה, בה משתווים הכוח הסוחב וכוח החיכוך.



קיים גם שימוש אחר לגלגל מעבר לגלגול הגופים על פני השטח. בשימוש זה משמש הגלגל כמנוף, כפי שנדון בפרק הקודם. בשימוש זה המיקוד הוא על היחס בין המאמץ, שמופעל על היקף המעגל, שרדיוסו R, ובין המאמץ, שמופעל על ידי הציר, שרדיוסו r, ועליו מורכב המעגל (תרשים יו').

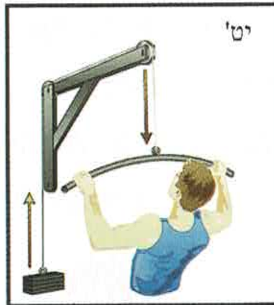


תפקיד זה של הגלגל עומד מאחורי פעולת "גלגל ההגה" (או "הגה"- תרשים יז') במכונית, ידית הדלת, ראש הברז, מפתח, מברג וכלים דומים. סיבוב הציר, עליו מורכב הגלגל בכוח F_w מלווה בכוח F_s, שמופעל על הציר. לפי ההגדרה היתרון המכאני של הגלגל על הציר הוא:

$$\eta = \frac{F_a}{F_s} = \frac{R}{r} \qquad (16)$$

ברור, אם כן, שבמקרה של הגה ברכב אנו מרוויחים בכוח, ובמקרה של גלגל המכונית שמונע על ידי הציר, אנו מפסידים בכוח של הציר, אך מרוויחים הודות לחילוף של גרירה לגלגול, כפי שהסברנו קודם.

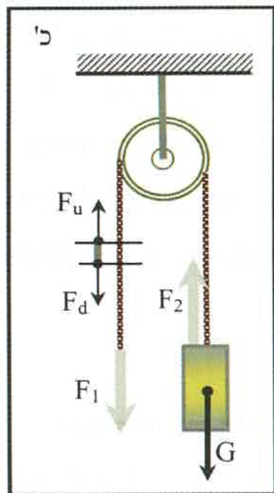
גלגילה וגלגלת



המכונה הפשוטה הבאה, אותה נציג, היא הגלגילה (או גלגלת). גלגילה היא גלגל קטן, שבהיקפו חריץ, ודרכו עוברים חבל או חוט. השימוש בה נעשה בשתי דרכים: כגלגילות קבועות או כגלגיליות ניידות.

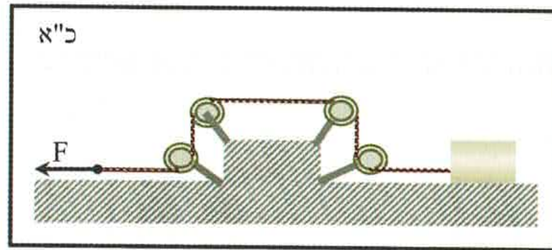
נתחיל בגלגילה הקבועה, המחוברת לקיר או לכל משטח נייח אחר. אנו רואים (תרשים יט'), שהגלגילה משנה את כיוון פעולת הכוח. שינוי כזה הוא חשוב לנוחיותו של מפעיל הכוח, זאת משום שנוח יותר למשוך את החבל כלפי מטה, מאשר למשוך את המשא כלפי מעלה. כיצד מתרחש שינוי זה?

החבל מונח על הגלגלת, ובהיותו גמיש הוא עוטף את הגלגלת (תרשים כ'). החבל גם נמתח עקב העובדה, שעל הקצה האחד שלו פועל כוח F, ועל הקצה השני – משקולת, עליה פועל כוח הכובד G. מתיחת החבל עוברת לכול אורכו, מחלק לחלק. ניקח חלק קטן של החבל (כמו בתרשים כ'). הכוחות הפועלים עליו הם F_u כלפי מעלה ו- F_d כלפי מטה. כוחות אלה מותחים אותו. בשיווי משקל כוחות אלה שווים (אנו מזניחים את כוח הכובד הפועל על החבל עצמו, "החבל קל מאוד"). ניתן אם כן לעבור מקטע אחד קטן לקטע, הסמוך לו, ולהגיע למסקנה, שכוחות המתיחות בחבל אינם משתנים לאורכו ("חבל קל"). כך מגיעים למסקנה, שכדי לאזן את כוח הכובד G מעבר לגלגלת אחת, יש למשוך בחבל בכוח, השווה לכוח הכובד G:



$$F_2 = F_1 = G \qquad (17)$$

מכאן, המסקנה היא, שכל מה שעושה גלגילה אחת הוא שינוי בכיוון הפעלת הכוח. הוספת גלגילה קבועה נוספת תשנה שוב את כיוון הפעלת הכוח בהתאם לצורך (תרשים כ"א).



נשים לב, שיחד עם שמירת גודל הכוח נשמר גם אורך התזוזה של החבל בכל קטע שלו (החבל גם לא מתארך!). מכאן ברור גם, שגודל העבודה בשימוש בגלגלת אינו משתנה, והיתרון המכאני שלה שווה לאחד: אין ריווח או הפסד בכוח ובמרחק הפעלתו.

המצב משתנה, כאשר גלגילה אחת יכולה לנוע (תרשים כ"ב). החבל עובר דרך גלגלת ניידת וקשור לתקרה. בקצהו השני החבל נמתח על ידי האדם, והמשא קשור לגלגליה עצמה. במצב זה הכוחות מצד שני החבלים מאזנים את המשקולת. מההסבר הקודם נשארת בתוקף הטענה, שמתיחות החבל אינה משתנה לכל אורכו. לכן נוכל לרשום שבמצב האיזון:

$$2F= G \qquad (18)$$

או: $F = \frac{1}{2}G$

זהו הריווח בכוח במקרה של גלגלת ניידת (יתרון מכני שווה ל- 2). מצב דרך הפעולה של הכוחות השתנה גם הוא. אם נמשוך מטר אחד של החבל, המשא יעלה רק בחצי מטר. זהו האילוץ המבני של המערכת. באופן כללי נקבל, שהיחס בין הדרכים של המשא L_G לבין החבל L_F הוא:

$$L_F = 2L_G \qquad (19)$$

זהו הפסד במרחק עבור הכוח F. על סמך (18) ו- (19) חוזרים ומקבלים שוב, ששני הכוחות ביצעו את אותה העבודה:

$$A = F \cdot L_F = G \cdot L_G \qquad (20)$$

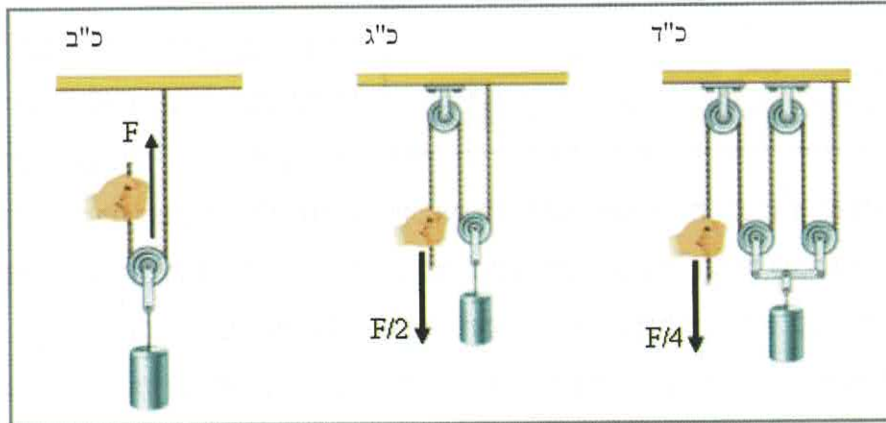
נמשיך ונוסיף גלגליה נייחת (תרשים כ"ג). ניתן לראות, שהדבר, שהשתנה, הוא רק כיוון המשיכה של היד. כל היתר נשאר כמו במקרה הקודם. לעומת זאת במתקן, שמיוצג בתרשים כ"ד, הכולל שתי גלגליות ניידות ,הקשורות למשא, נקבל במצב האיזון:

$$F = \frac{1}{4}G \qquad (21)$$

אך גם יחס הדרכים הופך ל:

$$L_F = 4L_G \qquad (22)$$

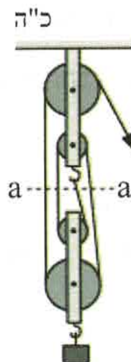
כך ששוב נשמרת העבודה השווה של שני הכוחות.



נוכל לסכם עבור מתקן גלגליות מסוג זה:

1. הגלגילה הניידת גורמת לריווח פי 2 בכוח ולהפסד שווה במרחק הפעולה.
2. הגלגילה הנייחת גורמת לשינוי בכיוון הפעלת הכוח.
3. העבודה של הכוח, המפעיל את הגלגילה, שווה בגודל לעבודה של כוח הכובד, המופעל על המשא.

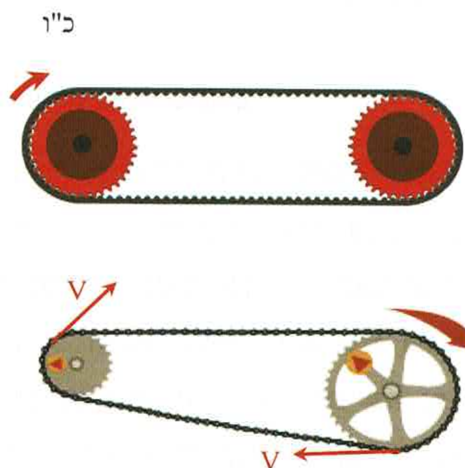
גלגלת מורכבת



גלגלות מורכבות מסוג אחר הן גלגלות, הבנויות מצירופים של גלגלים רבים, המכונה פוליספט (או פולי). הגלגלות קשורות לתקרה (תרשים כ"ה). בדוגמה זו שתי גלגליות הן נייחות ושתיים ניידות. ניתן לראות, שהריווח בכוח הוא גם פי ארבע, וההפסד בדרך הוא בהתאם: פי ארבע. כלומר, העיקרון נשאר בתוקף, וגם הכללים, שהסקנו. כדי להשתכנע בכך, כדאי לשים לב שבחתך aa, ארבעה חוטים מאזנים את המשא, ולכן הרווח בכוח הוא פי ארבע. ההפסד בדרך מתרחש הודות לכל גלגליה ניידת (פי שניים).

במכונות רבות קיים הצורך להעביר את סיבוב המנוע למקום הפעולה של המכונה. בעיה טכנולוגית זו מקבלת פתרון באמצעות **תמסורת**, הכוללת שני גלגלים, היכולים להיות בעלי קוטר זהה או שונה. סוגים נפוצים של תמסורות הם תמסורת רצועה ותמסורת גלגלי שיניים. כדאי לציין, שהראשון, שהציע תמסורות מסוגים שונים, היה לאונרדו דה וינצ'י עוד במאה ה-15.

תמסורת רצועה



תמסורת זו מורכבת מגלגלים מחורצים ומרצועה, העשויה מגומי או מעור, המקיפה אותם בלולאה. החיכוך הסטטי בין הרצועה לבין הגלגלים מונע כל החלקה בין הרצועה לבין הגלגלים. כתוצאה מכך סיבוב של אחד מהגלגלים גורם לסיבוב הרצועה, ותנועתה גורמת לסיבוב הגלגל השני.

אם אין החלקה בין הרצועה לבין הגלגלים, ינועו נקודות המגע של שני הגלגלים במהירות משותפת V עם הרצועה (תרשים כ"ו). היות והמהירות המשיקית V קשורה למהירות הזוויתית ω באופן: $V = \omega \cdot R$ (R הוא רדיוס הסיבוב), ניתן לקבל את היחס בין מהירות הסיבוב בתמסורת על ידי השוואה בין המהירויות המשקיות של שני הגלגלים:

$$\omega_1 \cdot R_1 = \omega_2 \cdot R_2 \qquad (23)$$

כידוע, ניתן לבטא את המהירות הזוויתית של הגלגל באמצעות מספר הסיבובים בשנייה n:

$$\omega = 2\pi \cdot n \qquad (24)$$

מכאן נקבל את הקשר בין הסיבובים, המתקיים בתמסורת:

$$n_1 \cdot R_1 = n_2 \cdot R_2 \qquad (25)$$

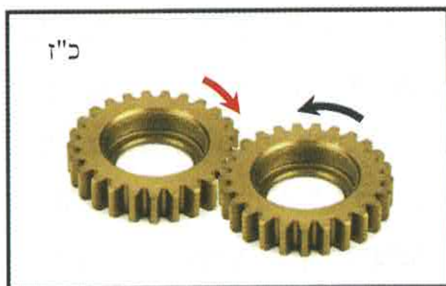
או:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{R_2}{R_1} \qquad (26)$$



אם גלגלי התמסורת הם בעלי קטרים שונים, אזי,סיבוב של גלגל אחד יגרום לסיבוב של הגלגל השני, והיחס בין מספר הסיבובים של הגלגלים יהיה הפוך ליחס הקטרים (או הרדיוסים) שלהם. כלומר, סיבוב אחד של הגלגל הגדול ($R_1>R_2$) יגרום למספר סיבובים של הגלגל הקטן ($n_1<n_2$).

תמסורת גלגלי שיניים



כאמור, תמסורת רצועה עובדת הודות לכוח החיכוך, אשר מונע את ההחלקה בין הרצועה והגלגלים. כאשר מדובר במאמצים גבוהים, החיכוך הסטטי עם הרצועה אינו מספק, ויש צורך במנגנון אחר. זוהי הדרישה גם כאשר נדרש דיוק גבוה מאוד בקצב המעבר של התנועה, כגון בשעון מחוגים. הבעיה נפתרת באמצעות תמסורת של גלגלי שיניים, המצויים במגע ישיר, ללא רצועה (תרשים כ"ז).

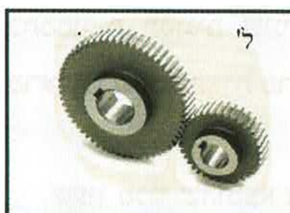
הצימוד של גלגלי שיניים מעלה מאוד את החיכוך ביניהם, חיכוך זה יכול לעמוד במאמצים גבוהים מאוד ללא החלקה בין הגלגלים. צירופים שונים של גלגלי שיניים בעלי גדלים וצורות שונות מאפשרים לשלוט בִּכיוון ובקצב התנועה, המועברת בין החלקים השונים של המכונה.

שיניי הגלגלים מסודרות במרחקים שווים זו מזו בהיקף הגלגל, וזה מבטיח קצב אחיד של סיבוב הגלגלים. נשים לב, שהגלגלים שבמגע מסתובבים בכיוונים הפוכים. היות והמהירות המשיקית של שני הגלגלים שבמגע חייבת להיות מהירות משותפת, נשאר בתוקף הקשר בין קצב הסיבובים של שני הגלגלים:

$$\frac{n_1}{n_2}=\frac{R_2}{R_1} \qquad (26)$$

על סמך קשר זה מתכננים האטה, האצה או שמירת קצב הסיבוב של התנועה המועברת (תרשים כ"ט).





בהתאם לצרכים הטכנולוגיים, המופיעים במכונות שונות, התפתחו סוגים שונים של תמסורות, המבוססות על גלגלי שיניים. נצביע על כמה סוגים. תרשים ל' מציג תמסורת, המעבירה תנועה סיבובית בין שני צירים מקבילים.

תרשים ל"א מראה את התמסורת, המשלבת גלגל עם פס שיניים ישר. שימוש בצירוף זה מאפשר להמיר תנועה סיבובית לתנועה קווית, ולהיפך.

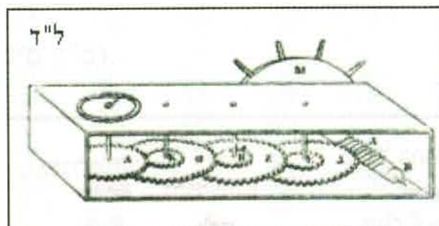
תרשים ל"ב מראה תמסורת, המשלבת שני גלגלי שיניים **קוניים**. תמסורת זו מאפשרת לשנות את כיוון הסיבוב מתנועה סיבובית אנכית לתנועה סיבובית אופקית, ולהיפך כמובן. למטרה זו ניתן להשתמש גם בתמסורת חילזון (תרשים ל"ג). תמסורת זו כוללת גלגל שיניים אחד בצימוד לגלגל, הנושא **הברגה**. גלגל שניים כזה מכונה "חילזון", ובהתאם נקראת התמסורת בשם "**תמסורת חילזון**".


ל"ג

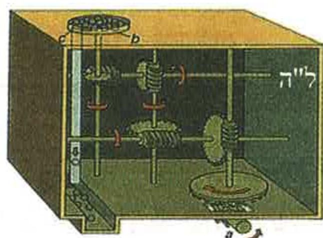

ל"ב


ל"א

כאמור, תמסורות אלה מהוות חלק חיוני במכונות רבות. נשארו עדויות לכך, שכבר ארכימידס במאה השלישית לפני הספירה, פיתח מכונות, ובהם תמסורות של גלגלי שניים (תרשים ל"ד). המכשיר מדד את מרחק ההפלגה של ספינת ים.

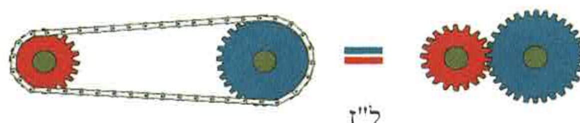


במאה הראשונה, המדען היווני הרון, שחי באלכסנדריה, תכנן גם הוא מכשירים, בהם השתמש בתמסורות מסוגים שונים, אותם הצגנו. תרשים ל"ה מראה מכשיר למדידת מרחק בנסיעה על היבשה.



שעון מכני שהומצא במאה ה-12 כולל תמסורות גלגלי שניים רבות (תרשים ל"ו). בתכנוני מכשירים על ידי לאונרדו דה וינצ'י, שחי במאות ה-15 וה-16, השימוש בתמסורות השונות הגיע לשיאו. בין ההמצאות הרבות של ליאונרדו בתחום זה הייתה המצאת תמסורת המשלבת תמסורת רצועה עם תמסורת של גלגלי שיניים. אנו משתמשים בתמסורת זו באופנים ובאופנועים, למשל (תרשים ל"ז).





נסכם:

1. תמסורות משמשות ככלי להעברת התנועה בין חלקי המכונות.
2. תמסורות מאפשרות התאמת כיווני הסיבוב של חלקי המכונות.
3. תמסורות מאפשרות התאמת קצב הסיבוב של חלקי המכונה השונים בהתאם לצורך.



מכונות פשוטות

1. תארו מה יתרונו ומה חסרונו של כל אחד מהמכשירים כמכונה פשוטה.

חולץ



נורה



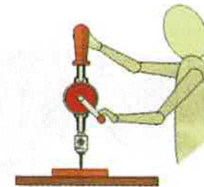
פקק



מלחציים



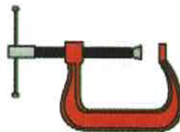
מקדחה ידנית



כסא לפסנתר



כליבה



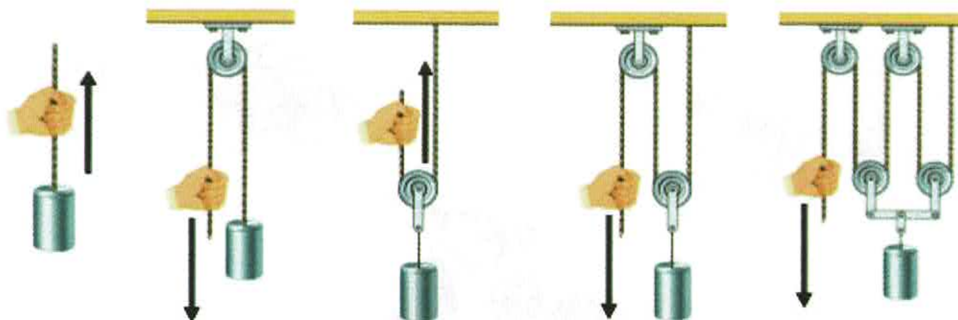
2. בכל המערכות המתוארות גודלה של המשקולת 10N, והיא עולה 1m.

מצאו עבור כל אחד מהמצבים:

א. באיזה כוח נמשך החבל?

ב. מהו אורך הדרך, שלאורכה פעלה היד?

ג. מהו היתרון המכאני?



3. על סמך הנלמד בפרק זה הסבירו את פעולת המכשירים הבאים, הכוללים גלגל ובורג. באילו מקרים מדובר ביתרון מכני, ומהי ההצדקה הפיזיקאלית לשימוש בכל אחד מן המכשירים האלה?
















4. תארו את פעולת כל אחד מהמכשירים הבאים כיתד. סמנו את הכוחות הפועלים בכל מכשיר.

רוכסן



מגבה



מעצור



גרזן



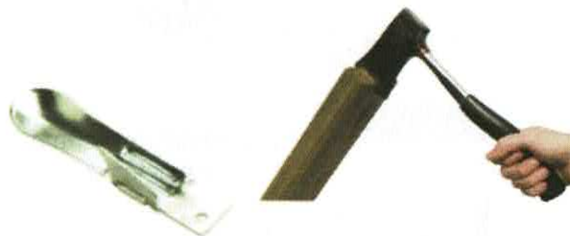
מקצוע

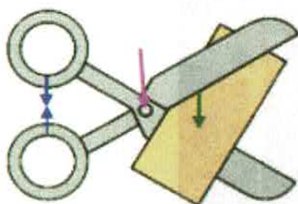


סכין



5. דונו בשלושה מכשירים: מספריים, גרזן ופותחן קופסאות, המהווים מכשירים, בהם צורפו מנוף ויתד.





לגבי כל אחד מן המכשירים

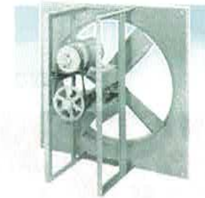
א. זהו את סוג המנוף.

ב. הסבירו את אופן פעולתו.

ג. התייחסו ליתרון המכני של המכשיר.

6. עבור כל אחד מהמכשירים תארו את יתרונו המכני כמכונה פשוטה.

מאוורר



מסוע



מלטשה



מדחס



מקדחה



מערבל

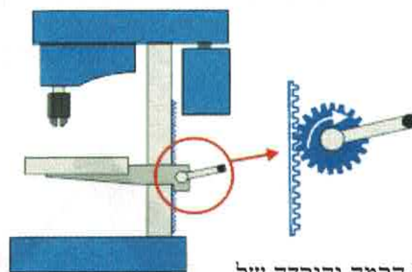


7. עבור כל אחד מהמכשירים ציינו את תפקידו ואת סוג התמסורת הנכללת בו.

(קונית, חלזונית, גלגל עם פס שיניים ישר).

מקדחה





מיתקן הרמה והורדה של שולחן עבודה

היגוי ברכב



מגבים



פרק ט"ז - אנרגיה פוטנציאלית

בפרק הקודם נוכחנו לדעת, שכאשר מופעל על גוף כוח לאורך דרך מסוימת, מצבו של הגוף משתנה, למשל, מהירותו משתנה. במקרה זה מצבו של הגוף מתואר על ידי האנרגיה הקינטית, ואנרגיה זו משתנה עקב הפעלת כוח. כאמור, את פעולת הכוח מאפיינים בגודל המכונה עבודה. עקב ביצוע של עבודה, גוף יכול להתחיל לנוע, וכאשר הגוף כבר נמצא בתנועה, עבודתו של הכוח יכולה להגביר את תנועתו (עבודה חיובית) או להקטין אותה, כלומר, להאט את הגוף (עבודה שלילית).

כאשר על הגוף פועלים מספר כוחות, הם יכולים לגרום לתוצאות שונות בהתאם ליחס בין הכוחות. במקרה זה ניתן לטעון, שבו-זמנית מתבצעות מספר עבודות, חיוביות (הכוח פועל בכיוון התנועה) ושליליות (הכוח פועל נגד כיוון התנועה).

לעיתים, במקרה של עבודה שלילית, במקום לומר: "הכוח מבצע עבודה שלילית על הגוף" יכולים לומר: "הגוף מבצע עבודה נגד הכוח". לשתי ההתבטאויות משמעות זהה.

לפי ההגדרה, העבודה של כוח צריכה להיות תלויה גם בכוח וגם בדרך, אך ישנם כוחות בעלי תכונה מיוחדת: העבודה, שהם מבצעים, תלויה בנקודות ההתחלה והסוף של הדרך, בה פועל הכוח, אך העבודה אינה תלויה בצורת המסלול, בו עובר הגוף בין הנקודות האלו. כוחות אלה מכונים בשם **כוחות פוטנציאלים**. ביניהם נמנה את כוח הכובד, הכוח חשמלי והכוח האלסטי בקפיץ.

הודות לתכונה מיוחדת זו, ניתן להגדיר גודל מיוחד כך, שהעבודה של כוח פוטנציאלי, המתבצע במעבר בין שתי הנקודות במרחב 1 ו-2, ניתנת כהפרש (שינוי) של גודל זה. זהו המושג החדש המכונה **אנרגיה פוטנציאלית** – E^{pot}. נוכל לכתוב:



$$W_{12} = E_2^{pot} - E_1^{pot} = \Delta E$$

כאמור, האנרגיה הפוטנציאלית מאפיינת את המקום במרחב ואת הכוח, הפועל בו. עם זאת חשוב מאוד להבין, שהתלות במרחב נוחה רק באופן תיאורי. מה שעומד מאחורי תלות זו היא ההשפעה ההדדית (אינטראקציה), פעולת הגומלין בין גופים, קטנים או

גדולים. במילים אחרות, מאחורי כל אנרגיה פוטנציאלית עומד אפיון האינטראקציה – כוח.

לדוגמה, הגופים ליד כדור הארץ מצויים באינטראקציה כובדית איתו, וכתוצאה מכך ניתן לאפיין כל גוף, הנמצא במקום מסוים, על ידי **היכולת** לבצע עבודה, כשנשחרר אותו. יכולת זו (בלעז – **פוטנציה**) היא האנרגיה **הפוטנציאלית הכובדית**.

היא קובעת עבודה של כוח הכבידה, השווה לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית. בדומה, ניתן לדבר על אנרגיה **פוטנציאלית** של **מטענים חשמליים**, הקובעת את עבודת הכוח החשמלי.

ניתן לדבר גם על אנרגיה **פוטנציאלים אלסטית**, הקובעת את העבודה של כוח אלסטי בקפיץ, למשל. במקרה זה יש לשים לב, שאיננו רואים את החלקיקים הקטנים, אשר נוכחים ומקיימים אינטראקציה חשמלית ביניהם, אלא רק לתוצאה שלה בגדול – לכוח האלסטי.

אם הכוח הפוטנציאלי הוא הכוח היחיד, הפועל על הגוף, השינוי באנרגיה הפוטנציאלית, המלווה לעבודת הכוח, יגרום לשינוי באנרגיה הקינטית של הגוף. כאשר כוח פוטנציאלי פועל בו-זמנית כנגד כוח אחר, מתרחשת **המרה** (גלגול) של אנרגיה פוטנציאלית לסוג אחר של אנרגיה.



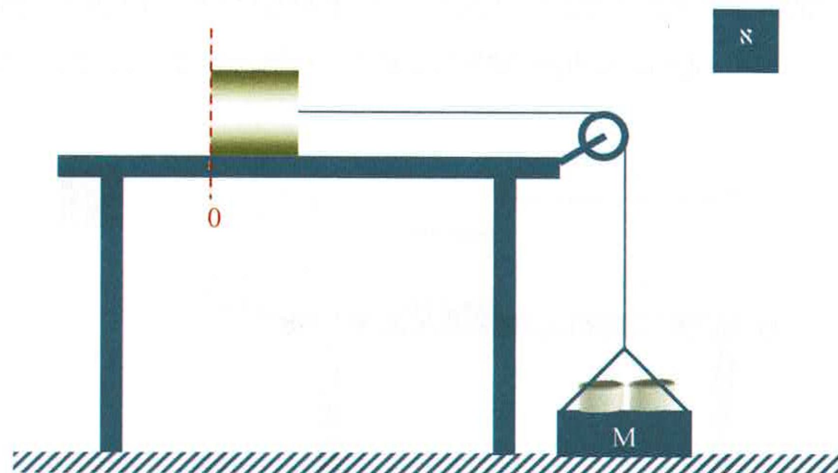
בפרק זה נעסוק בשני סוגים של כוחות פוטנציאליים: **כוח הכובד והכוח האלסטי**.

I. אנרגיה פוטנציאלית כובדית

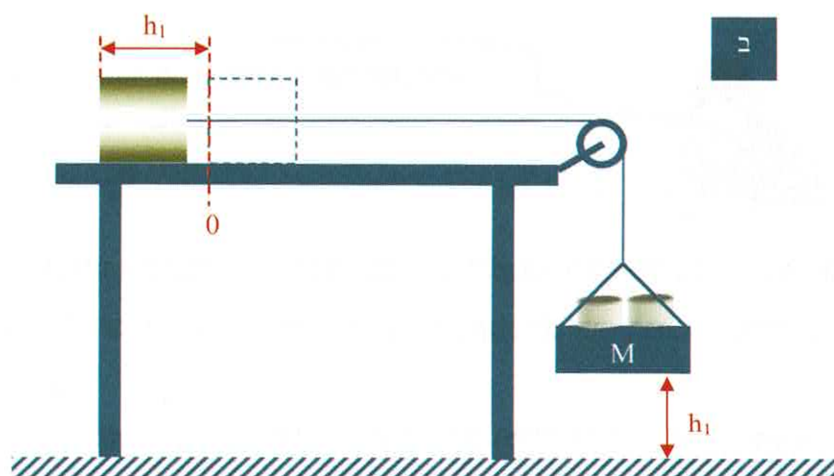
עתה, באמצעות מספר הדגמות, נבדוק את הגורמים, הקובעים את גודל עבודתו של כוח הכובד, וכך נבין את תכונות האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית.

הדגמה מס' 1

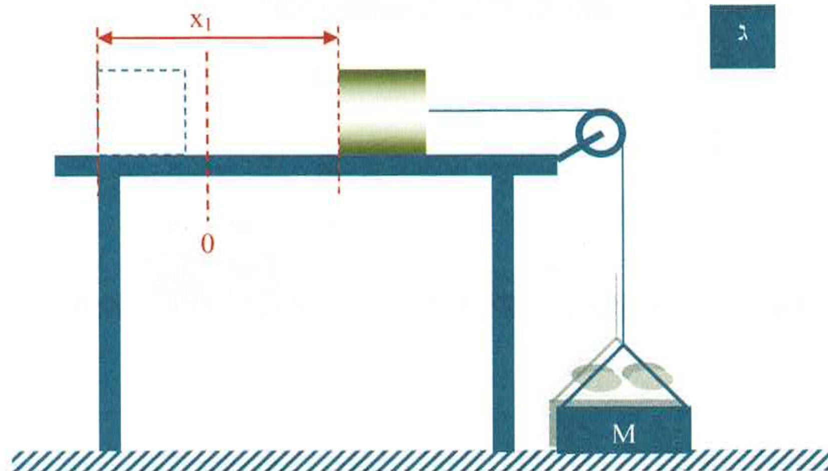
סלסלה מונחת על הרצפה ובתוכה משקולות. נקשור אליה קצה אחד של חוט, ואת קצהו השני נעביר דרך גלגלת, ונקשור לבול עץ, המונח על השולחן. נמשוך את בול העץ שמאלה, עד שהחוט יהיה מתוח, ונסמן את מיקומו האחורי ב- 0 (מצב א').



כשנמשוך את בול העץ שמאלה מנקודת ה- 0, הסלסילה עם המשקולות תתרומם מעל הרצפה. נסמן את גובהה מעל הרצפה ב-h_1. זוהי גם מידת התזוזה של הגוף שמאלה על השולחן (מצב ב').



ברגע שנשחרר את בול העץ, שני הגופים (הבול והסלסילה) ינועו ימינה ומטה. תנועת הבול תימשך, גם לאחר שהסלסילה תגיע אל הרצפה, עד שהוא ייעצר עקב החיכוך עם השולחן. הבול יעבור מרחק של x_1, שהוא גדול יותר מ-h_1. (מצב ג').





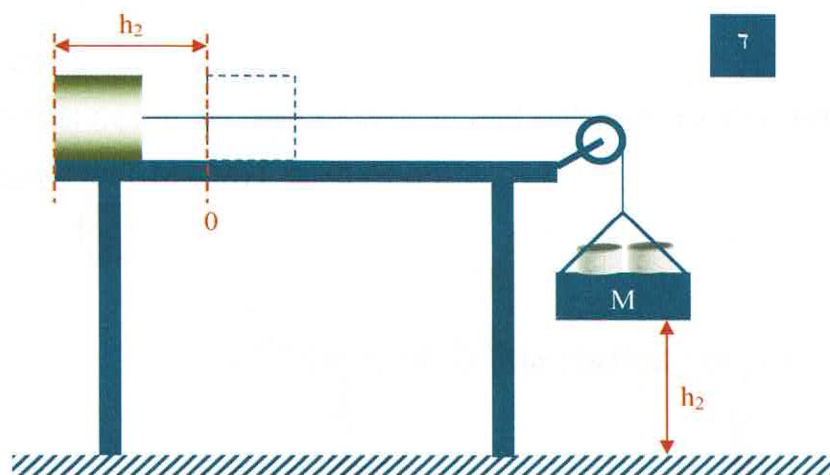
בתחילה הרמנו את הסלסילה לגובה (מצב ב'), והפעלנו כוח כנגד כוח הכובד. שני כוחות ביצעו כאן עבודה: אנחנו – חיובית (בכיוון התנועה), וכוח הכובד – שלילית (נגד כיוון התנועה).

בכך שינינו את מצב הסלסילה ביחס לרצפה (כדור-הארץ), ולכן, שינינו גם את האנרגיה הפוטנציאלית של הסלסילה.

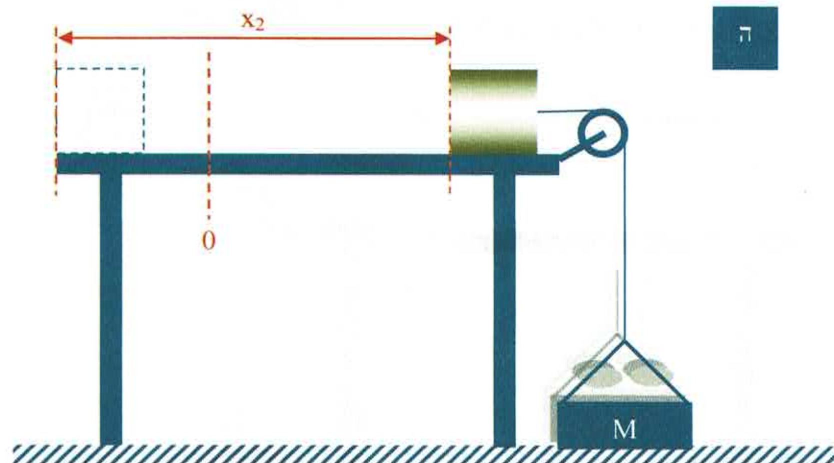
לאחר שהפסקנו להפעיל כוח, כוח הכובד משך את הסלסילה כלפי מטה. הפעם הוא ביצע עבודה חיובית על הגופים, ושינה את מצב תנועתם. בעקבות כך גדלה האנרגיה הקינטית של שני הגופים שבתנועה. לאחר שהסלסילה הגיעה אל הרצפה (מצב ג'), בזמן ההתנגשות עם הרצפה, נגרם שינוי פנימי הן של הרצפה והן של הסלסילה (עיוות וחימום).

האנרגיה הקינטית ירדה, והאנרגיה הפנימית עלתה, הן של הרצפה והן של הסלסילה. ומה קרה לבול העץ? תחילה הוא הגביר את תנועתו בעקבות המתיחה מצד החוט, אך לאחר זמן מה, עקב החיכוך עם השולחן, בול העץ האט, עד שנעצר. באותו זמן בוצעה עבודה על ידי כוח החיכוך, והבול והשולחן התחממו. אפשר לומר, שהאנרגיה הקינטית של בול העץ עברה לאנרגיה הפנימית של השולחן והבול.

עתה נמשוך את בול העץ למרחק גדול יותר. הסלסילה תורם לגובה רב יותר, h_2 (מצב ד').



ברגע שנרפה מבול העץ, יתרחש תהליך הדומה למקרה הראשון, אך המרחק x_2, שיעבור הבול עד העצירה, יהיה ארוך יותר (מצב ה').



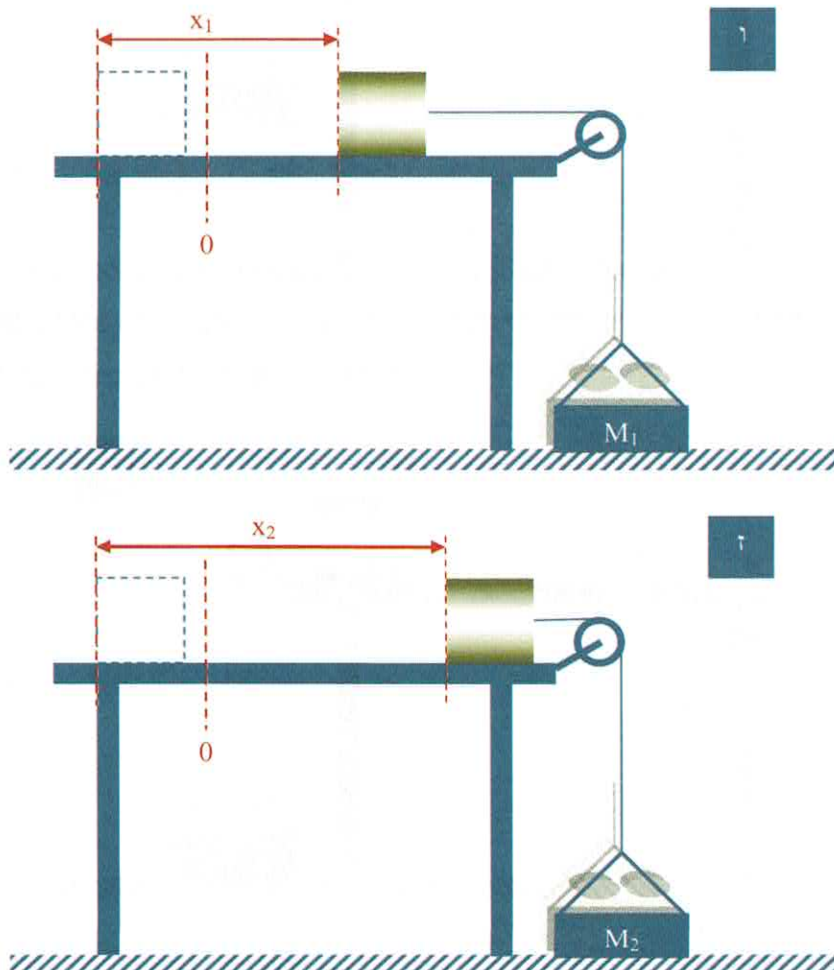
הגדלת המרחקים, גם של הגובה ($h_2>h_1$) וגם של מרחק העצירה ($x_2>x_1$), מעידה על כך שבמקרה השני בוצעו עבודות גדולות יותר, גם על ידי כוח הכובד, וגם על יד כוחות החיכוך, ולכן, השינוי באנרגיה הפוטנציאלית היה גדול יותר מאשר במקרה הראשון.

מסקנה: השינוי באנרגיה הפוטנציאלית הכובדית גדל עם הגדלת הפרשי הגבהים במשך התנועה

לאותה מסקנה היינו מגיעים גם מתוך העובדה, שכוח הכבידה מבצע יותר עבודה לאורך ירידה מגובה גדול יותר.

הדגמה מס' 2

נחזור להדגמה הקודמת, אך הפעם לא נשנה את גובה העלייה של הסלסילה, אלא רק את **מספר המשקולות** ($M_2>M_1$) (מצבים ו' ו- ז').



נקבל, שעבור מספר גדול יותר של משקולות בסלסילה, המרחק של בול העץ עד לעצירתו יהיה גם הוא גדול יותר, כלומר: $x_2>x_1$.

מכאן, בדומה למקרה הקודם, נסיק, שעקב המספר הרב יותר של משקולות, גדלה העבודה של כוח הכובד. התארכות מרחק העצירה $(x_2>x_1)$ היא עדות לעליית העבודה של כוח החיכוך, ולכן גם של האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית בהתחלת ההדגמה.

מסקנה: האנרגיה הפוטנציאלית גדלה יחד עם תוספת המשקל המורם

שוב, לאותה המסקנה היינו מגיעים גם מתוך העובדה, שכוח הכבידה מבצע יותר עבודה במקרה של מספר רב יותר של משקולות לאורך אותה הדרך.

נשים לב להתבטאות הנפוצה "אנרגית גובה **נאגרת בגופים**". אין זה ביטוי מוצלח, כי כאשר מדברים על אנרגיה פוטנציאלית כובדית, מתכוונים רק לאפיון מצב הדדי בין הגופים, המאפשר תהליך של התקרבות ביניהם, המלווה בעבודה של כוח המשיכה הכובדית. בגוף, למעשה, לא נאגר דבר.

נסכם:

שינוי באנרגיה פוטנציאלית כובדית תלוי בגודל המשקל של הגוף, ובמידת השינוי בגובהו מעל פני הקרקע.



כדי לברר את הקשר הכמותי שבין תוספת האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית לבין תוספת הגובה והמשקל העולה, נבצע עוד ניסוי:

ניסוי חקר של אנרגיה פוטנציאלית כובדית

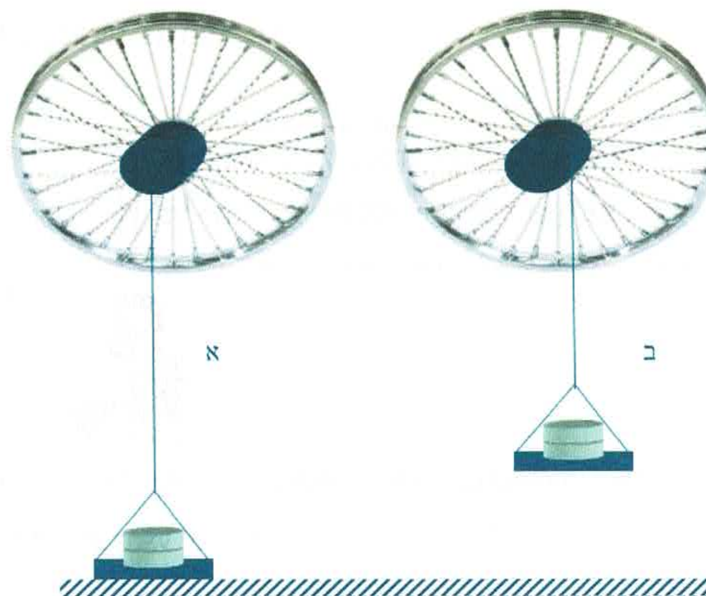
הניסוי יאשר את **התלות הכמותית**, הקיימת בין השינוי באנרגיה הפוטנציאלית E^{pot} של גוף לבין משקלו והגובה, שבו הוא נמצא. הרעיון הוא לאפשר **המרה**, עד כמה שאפשר מלאה, של האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של גוף אחד לאנרגיה פוטנציאלית של גוף שני. הגוף הראשון יורד מגובה מסוים ומסובב את הגלגל, שאל צירו הוא קשור. הגוף

השני מתרומם עקב המרת אנרגיית התנועה של הגלגל לאנרגיית גובה של הגוף השני. ההשוואה בין הגבהים והמשקלים של הגופים יצביע על מידת ההמרה ועל הקשר הכמותי, הקיים במקרה זה.

ציוד: כן יציב, גלגל אופניים, חוט ניילון, סלסלה, משקולות, סרגל ארוך. כליבה.

מהלך הניסוי:

1. באמצעות כליבה נהדק אל השולחן את הכן, אליו הורכב, באופן אנכי, גלגל אופניים. אל ציר הגלגל הורכב הגליל הפלסטי.
2. נסובב את הגלגל כך, שהמסמר שעל הגליל הפלסטי ימצא במצב הנמוך ביותר. נחבר את קצהו האחד של החוט לסרן הגלגל, ואת קצהו השני נקשור לסלסילה, שבתוכה שלוש משקולות. משקלה של הסלסילה יחד עם המשקולות הוא 9 ניוטון (ניוטון 9 = G_0). נדאג שהחוט יהיה מתוח לאחר קשירתו, והסלסילה כמעט תיגע ברצפה (תרשים א').



3. נסובב את הגלגל כך, שהחוט יתלפף סביב הגליל הפלסטי, עד שתחתית הסלסילה תעלה לגובה של 0.4 מטר מעל לרצפה (h_0= 0.4 מטר).
4. חשבו את גודל $G_0 \cdot h_0$. מהי המשמעות הפיסיקלית של מכפלה זו ?

5. אחרי שנרפה מהגלגל, תרד הסלסילה ותגיע לנקודה הנמוכה ביותר (כמעט לרצפה). רגע לפני שהסלסילה תתחיל לעלות (עקב המשך סיבוב הגלגל), נשלוף משקולת אחת מהסלסילה בעזרת החוט הקשור אליה. בסלסלה יהיה עתה משקל חדש, קטן יותר, G. את הגובה החדש, אליו תעלה הסלסילה, נסמן ב-h. כדי להקטין את שגיאת המדידה נבצע שלוש מדידות עבור כל ערך של G. כל הניסויים עבור כל ערך של G מתחילים בירידת הסלסילה (והמשקולות שבתוכה משקל G_0) מגובה h_0 מעל הרצפה.

6. חזרו על הניסוי מספר פעמים, כאשר בכל פעם הורידו מהסלסילה יותר משקולות. את התוצאות רשמו בטבלה.

G משקל	h_1 מדידה1	h_2 מדידה 2	h_3 מדידה 3	$\bar{h}$ גובה ממוצע	$\frac{1}{\bar{h}}$	$G\cdot\bar{h}$	$\frac{G\cdot\bar{h}}{G_0\cdot h_0}$
9							
6							
5							
4							
3							

7. על סמך הנתונים שקיבלתם, שרטטו גרף של G כפונקציה של $\bar{h}$. האם קיבלתם קו ישר? אם לא, נסו להסביר את הקשר שבין שני הגדלים G ו-$\bar{h}$.

8. שרטטו גרף של G כפונקציה של $\frac{1}{\bar{h}}$, איזה גרף קיבלתם? האם הגרף עובר דרך ראשית הצירים?

9. חשבו את שיפוע הקו שהתקבל. השוו בינו לבין הגודל, שחישבתם בסעיף 4.

10. חשבו את המכפלה $G\cdot\bar{h}$ עבור כל שלב, ורשמו אותו בטבלה. חשבו את היחס $\frac{G\cdot\bar{h}}{G_0\cdot h_0}$ עבור המדידות, ורשמו אותו בטבלה. מה מבטא יחס זה?

11. בהנחה שהגודל הנשמר בניסוי הוא גודל האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית, מהו הביטוי עבור אנרגיה זו?

12. תארו את גלגולי האנרגיה, שהתרחשו בניסוי.

13. כיצד היו משתנות תוצאות המדידה של h, לו היינו שולפים את המשקולת מתוך הסלסילה, לפני שהייתה מגיעה לנקודה הנמוכה ביותר?

א. האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הגוף יחסית לקרקע גדלה עם הגדלת כוח הכובד, המופעל על הגוף.

ב. האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הגוף גדלה עם הגדלת הגובה של הגוף יחסית לקרקע.

ג. גודל האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית ניתן על ידי ביטוי: $E^{pot} = G \cdot h$

G - כוח הכובד (משקל- מנוחה הנמדד בניוטונים).

h - גובה הגוף המורם (נמדדת במטרים).

E^{pot} - האנרגיה הפוטנציאלית הנמדדת ביחידות ג'ול.

ד. הגדלת אנרגיה של מערכת מסוימת בעקבות עבודה של כוח חיצוני, מאפשרת תהליכים, בהם אנרגיה יכולה לעבור מסוג לסוג תוך שמירת הכמות הכללית.

ה. פעולת הכוח כנגד כוח הכובד מעלה את האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הגוף. אנרגיה זו יכולה להפוך לסוגי אנרגיה אחרים, כאשר מתאפשרים תהליכים, בהם כוח הכובד פועל בכיוון התנועה של הגוף (מבצע עבודה חיובית).

בחירת רמת האפס

הגענו לביטוי עבור האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית: $E^{pot} = G \cdot h$. ציינו גם, שאת הגובה h מודדים "מהקרקע". מכאן מופיע צורך להבין את החשיבות הפיזיקאלית של המושג "קרקע". עד כמה חשוב איפה בוחרים אותה רמה, או כפי שנהוג להתבטא, איפה בוחרים את רמת האפס, איך ניתן לשנות אותה או להתייחס לגבהים הנמצאים מתחת לרמה שנבחרה?

נדמיין גוף A, המצוי על שולחן בגובה h_1 מעל הרצפה. העבודה, שהושקעה כנגד כוח הכובד על מנת להרים אותו מן הרצפה עד השולחן, היא בגודל $G \cdot h_1$. לכן גם הגדלת האנרגיה הפוטנציאלית היא בגודל זה. ברור, שמדובר באנרגיה פוטנציאלית יחסית לרצפה מסוימת. אם נרים את הגוף לגובה אחר, h_2, מעל לאותה רצפה, תהיה האנרגיה הפוטנציאלית של הגוף $G \cdot h_2$. תוספת האנרגיה הפוטנציאלית של הגוף היא:

$$G \cdot h_2 - G \cdot h_1 = G(h_2 - h_1) = G \cdot \Delta h.$$

אם נבחר אחרת רמת ייחוס, וניקח לשם כך את פני השולחן כרמת אפס, אזי, כשהגוף מונח על השולחן, לא תהיה לו אנרגיה פוטנציאלית כובדית, וכשנרים אותו לגובה h_2 מעל לרצפה, תהיה לו אנרגיה פוטנציאלית $G \cdot (h_2 - h_1)$. נשים לב, שלמרות השינוי בבחירת רמת הייחוס ובהתאם שינוי מתאים בגודל האנרגיה הפוטנציאלית, גודל העבודה של כוח הכובד אינו משתנה, ונשאר שווה ל: $G \cdot (h_2 - h_1) = G\Delta h$. מצב זה משקף את העובדה, שאנרגיה פוטנציאלית אינה "משהו" המצוי בתוך הגוף , אלא אפיון מצב מסוים מבחינת העבודה, שהושקעה, על מנת להעביר את הגוף למצב זה.

כמובן, בחירת רמת הייחוס לאנרגיה הפוטנציאלית אינה יכולה לשנות את גודל העבודה של הכוח, העובר ממקום למקום, כי:

השינוי באנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של גוף אינו תלוי בבחירת רמת הייחוס למדידת הגובה, אלא רק בהפרש הגבהים.

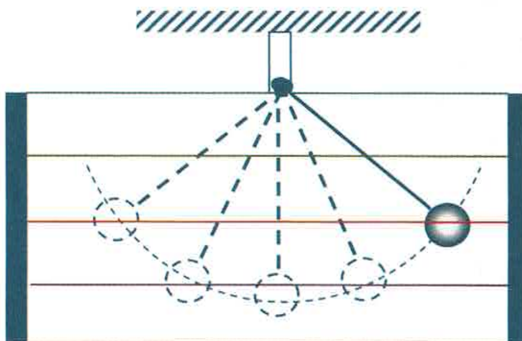
מקום קביעת גודל האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית

כאמור, כוח הכובד (משקל-מנוחה), הפועל על גוף, קובע את האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית שלו. נוכחנו לדעת, שמשקלו במנוחה של גוף משתנה ממקום למקום בהתאם לשינויים בכוח הכובד. מכאן ניתן להסיק, שגם האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הגוף **תלויה במקום**. נוכל לטעון למשל, שהשינוי באנרגיה הפוטנציאלית הכובדית בהזזת הגוף למרחק של מטר אחד יהיה שונה, אם נעשה זאת במקומות שונים על פני כדור הארץ, במרחק של 1000 ק"מ מן הארץ או על פני הירח.

תלות במסלול

הביטוי עבור האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית כולל את הפרש הגבהים, אולם גוף יכול להגיע לאותו גובה במסלולים שונים. האם זה משפיע?

בהדגמות ובניסוי שערכנו התרוממה המשקולת בקו ישר מאונך.



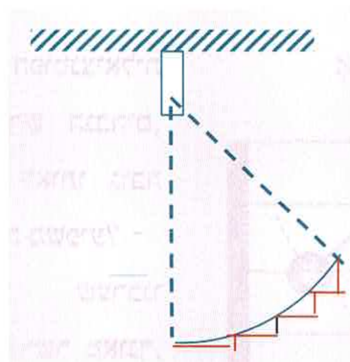
עבור מקרה זה מצאנו, שהאנרגיה הפוטנציאלית הכובדית שווה למכפלת המשקל בהגבהת הגוף. נזכיר שציינו ייחודיות של כוח הכובד, אשר מהווה כוח פוטנציאלי, ולכן עבודתו אינה תלויה במסלול בין שני מקומות. נראה עתה איך זה מתבטא באנרגיה פוטנציאלית כובדית:

ניקח משקולת תלויה – מטוטלת. מהתנודות שלה ניתן לראות, שהיא נעה בקשת מעגלית. נציב מאחורי המטוטלת לוח, ונשרטט עליו קווים אופקיים במרחקי גובה שווים. כך נוכל לקבוע את גובה המטוטלת בתנועתה (ראה תרשים). נסיט מעט את המטוטלת הצידה עד לגובה מסוים, ונרפה. נראה, שהמטוטלת תעלה לגובה זהה בצד השני. נזכור, שהגדרנו אנרגיה הפוטנציאלית לפי המכפלה של כוח הכבידה בגובה.

לכן תנודת המטוטלת, השומרת על האנרגיה (המכנית: הקינטית והפוטנציאלית כובדית גם יחד), מדגימה ש:

> האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית אינה תלויה במסלול בין הגבהים,
> אלא רק במרחק האנכי של המקום מעל לקרקע.

נפרש תוצאה זו: ניתן לראות, שתנועת המטוטלת מורכבת משתי תנועות: אופקית ואנכית. התוצאה של גובה שווה בתנודות המטוטלת מעידה על כך, שרק תנועה במאונך לכיוון האופק משפיעה ומשנה את האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית. התנועה האופקית אינה משפיעה על האנרגיה הפוטנציאלית, ובהתאם אינה גורמת לעבודת כוח הכובד. כך אפשר להבין, מדוע מתקבל שהאנרגיה הפוטנציאלית אינה תלויה במסלול, והיא תלויה אך ורק בהפרש שבין גובה העלייה או גובה הירידה של הגוף.





נוכל, אם כן, לסכם:

השינוי באנרגיה פוטנציאלית כובדית תלוי ב:

1. משקל-מנוחה של הגוף,
2. שינוי הגובה של הגוף,
3. מקום המדידה.

שינוי באנרגיה פוטנציאלית כובדית אינו תלוי ב:

1. בחירת רמת הייחוס,
2. צורת המסלול,
3. אורך המסלול.

נסיים בציון מספר דוגמאות של שימוש באנרגיה הפוטנציאלית הכובדית בחיי היום-יום:

א. מנצלים שינוי אנרגיית גובה של מים (לשם כך בונים סכר, הגורם לאיסוף המים ברמה גבוהה). אנרגיה זו הופכת תחילה לאנרגיה קינטית של המים, ואחרי כן לאנרגיה קינטית של הטורבינות והגנראטור, ולבסוף לאנרגיה חשמלית של מטענים חשמליים. כל זה מתרחש בתחנות הידרו- חשמליות המפיקות חשמל.

ב. צוברים אנרגית גובה בטיפוס על הרים מושלגים, ואחרי כן מבצעים גלישה, המלווה באנרגיה קינטית רבה של הגולש.

ג. אנרגיה כובדית של מים, הממוקמים באתר גבוה, מנצלים ליצירת זרימת מים לבתים, הממוקמים בגובה נמוך.

ד. צבירת אנרגיה כובדית על ידי פטיש ענק, המורם לגובה רב, מנצלים ליצירת אנרגיה קינטית רבה במכונת קידוח ובעבודות בנייה.

א. מנצלים שינוי באנרגיית הגובה של מים, כאשר אוספים אותם במיכלים מעל גגות הבניינים, וגורמים לזרימת מים מן המיכלים והדודים לתוך הדירות באותו הבניין.





תחנת-הכוח בנהריים ,שהקים פנחס רוטנברג, הייתה תחנה הידרו-אלקטרית, שהשתמשה במי נהרות הירמוך והירדן לצורך הפקת אנרגיה חשמלית.



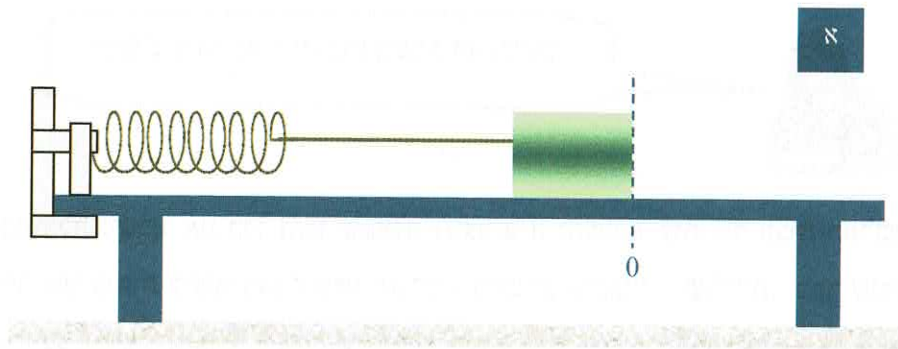


II. אנרגיה פוטנציאלית אלסטית

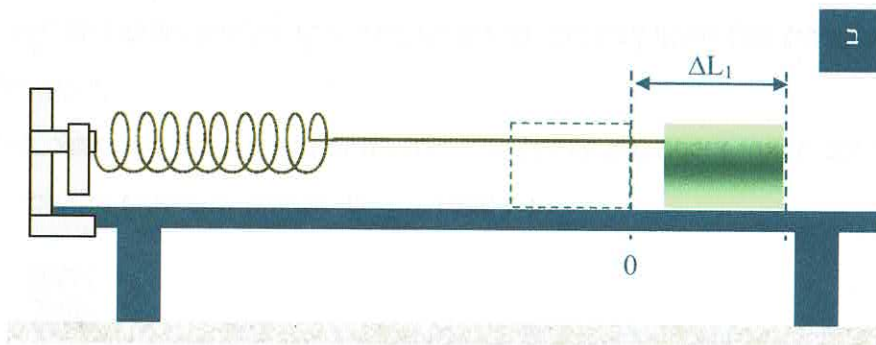
ניתוח עבודתו של כוח הכובד סייעה לנו להבין את תכונות האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית. עתה נבדוק עבודה של כוח פוטנציאלי אחר, הכוח האלסטי של קפיץ, וכך נגיע לתיאור מדויק של האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית. נתחיל משתי הדגמות:

הדגמה מס' 1

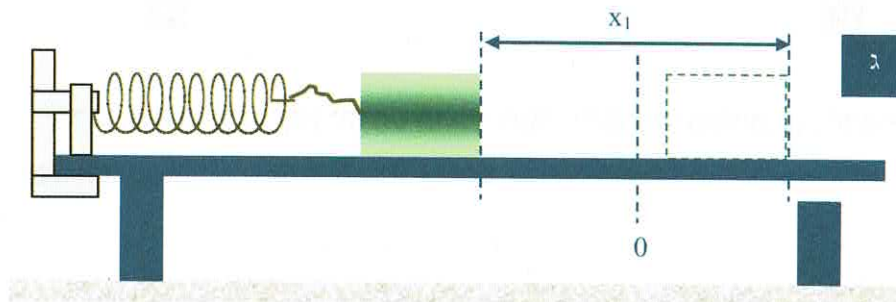
נהדק כליבה לשולחן ונחבר אליה קפיץ בעל קבוע-חוזק k. נקשור את הקפיץ אל קצה אחד של חוט, ואת קצהו השני – לבול עץ (אורך החוט כ- 60 ס"מ). נרחיק את בול העץ מהקפיץ, עד שהחוט והקפיץ יהיו ישרים, אך לא מתוחים (כמעט, כמובן). במצב זה נסמן את מיקומו האחורי של בול העץ ב- 0 (מצב א').



כאשר נמשוך את בול העץ שמאלה מנקודת ה- 0, הקפיץ יימתח ויתארך. נסמן את מידת התארכות הקפיץ ב- ΔL_1. זו תהיה גם מידת התזוזה של הגוף שמאלה על השולחן (מצב ב').



ברגע שנשחרר את בול העץ, הוא ינוע שמאלה, והקפיץ יחזור למצבו הרפוי.
התנועה של בול העץ תימשך, גם לאחר שהקפיץ יחזור למצבו הרפוי, עד שייעצר עקב החיכוך. כך יעבור הבול על פני השולחן מרחק של x_1,, שהוא גדול יותר מ- ΔL_1 (מצב ג').





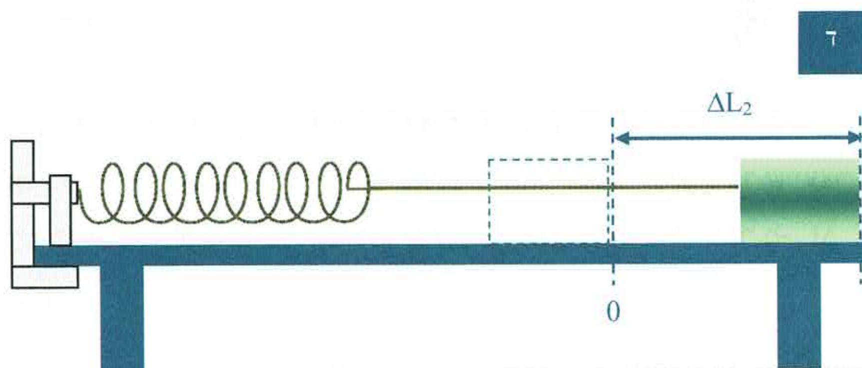
נפרש עתה מה קרה כאן בשפת האנרגיה:

בתחילה משכנו את בול העץ שמאלה (מצב ב'), והפעלנו כוח נגד הכוח האלסטי של הקפיץ. שני כוחות ביצעו כאן עבודה: אנחנו - חיובית, והקפיץ – שלילית. בכך שינינו את מצבו הפנימי של הקפיץ (של החלקיקים המרכיבים אותו), ולכן שינינו את האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית שלו.

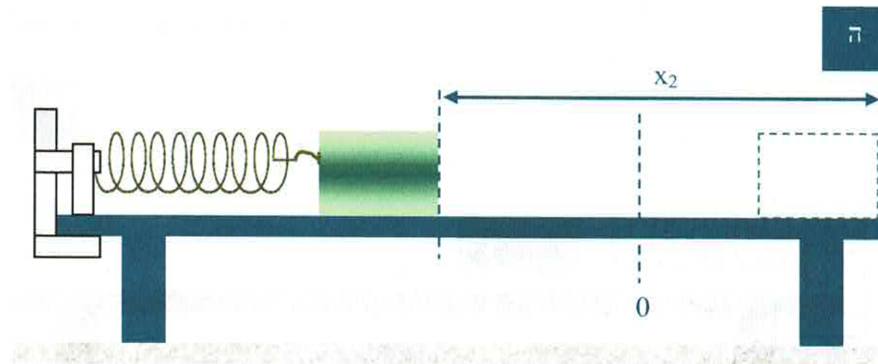
לאחר שהפסקנו להפעיל כוח על הבול, פעל עליו הכוח האלסטי. הפעם הוא ביצע עבודה חיובית על הגוף, ושינה את מצב תנועתו, כלומר, גרם להגדלת האנרגיה הקינטית של בול העץ.

בנוסף לכוח אלסטי, לאורך כל הדרך פעל על הבול גם כוח החיכוך. בעקבות כך בוצעה עבודה, על ידי כוח זה, ששינתה את מצבם של השולחן והבול: הם התחממו, ובול העץ האט, עד שנעצר. בתהליך זה אנרגיה קינטית של בול העץ עברה לאנרגיה פנימית של השולחן והבול.

עתה, אם נמשוך את בול העץ מרחק גדול יותר (ממצב ב'), הקפיץ יתארך במידה רבה יותר. נסמן את התארכותו החדשה ב- ΔL_2 (מצב ד').



ברגע שנרפה מבול העץ יתרחש תהליך דומה אך מרחק העצירה, x_2, יהיה ארוך יותר (מצב ה').



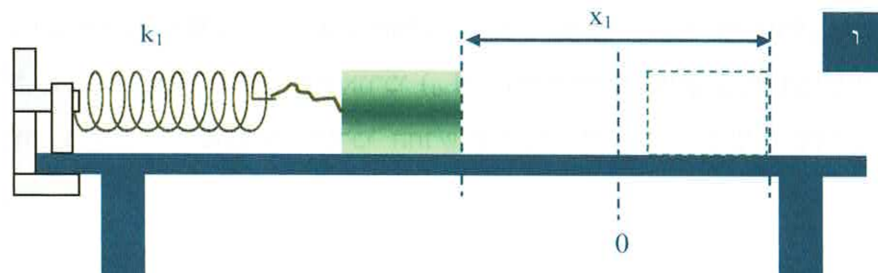
נוכל לרשום: $\Delta L_2 > \Delta L_1$ וגם: $x_2 > x_1$.

הגדלת מרחק התנועה של הבול מעידה על כך, שבמקרה השני בוצעה עבודה גדולה יותר, גם על ידי הכוח האלסטי, וגם על ידי כוחות החיכוך. לכן, גם השינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית היה גדול יותר מאשר במקרה הראשון. נוכל להסיק:

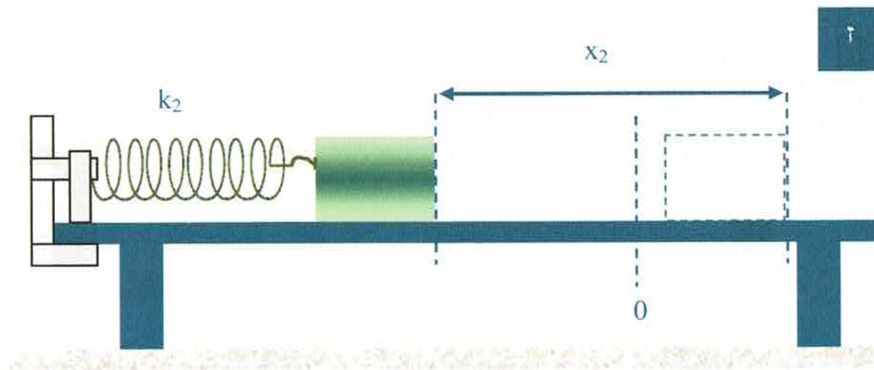
השינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ גדל עם הגדלת התארכות הקפיץ.

הדגמה מס' 2

נחזור על ההדגמה הקודמת, אבל בניגוד להדגמה מס' 1, שבה שינינו את מידת התארכות הקפיץ, הפעם נשנה את הקפיץ. פרוש הדבר הוא שנשנה רק את קבוע הקפיץ k (מצבים ו' ו- ז').



נקבל, שכאשר היחס בין קבועי- הקפיץ יהיה $k_2 > k_1$, המרחקים שיעבור בול העץ על פני השולחן יהיו בהתאמה, כלומר: $x_2 > x_1$.



בגלל הגדלת קבוע הכוח של הקפיץ, גדלו העבודות, שהושקעו על ידינו ובוצעו על ידי הכוח האלסטי. הגדלת מרחק העצירה $(x_2>x_1)$ היא עדות לעליית העבודה של כוח החיכוך, ולכן, לעליית האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ. נוכל להסיק:

> השינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ
> גדל יחד עם הגדלת קבוע הכוח של הקפיץ

ניסוי חקר של אנרגיה פוטנציאלית אלסטית של הקפיץ

נבצע ניסוי, בו תתרחש המרה של אנרגיה פוטנציאלית כובדית של סלסילה עם משקולות לאנרגיה פוטנציאלית אלסטית של קפיץ. על סמך שימור האנרגיה ננסה למצוא את התלות בין השינוי באורכו של הקפיץ לבין האנרגיה המוענקת לו. לשם כך נשתמש בקפיץ, המחובר אל כן, סרגל ארוך, סלסילה, משקולות, חוט, כליבה ופיסת קרטון.

חלק א' – ניסוי מקדים (מדידת קבוע הכוח של הקפיץ)

תחילה נקבע באופן ניסיוני את קבוע הכוח k של הקפיץ. לשם כך נתלה אותו עם הסלסילה, הקשורה אליו ונמדוד את אורכו (L_0). בזו אחר זו נשים בתוך הסלסילה את המשקולות, ונמדוד כל פעם את אורכו החדש של הקפיץ (L_n). נרשום נתונים אלה בטבלה:

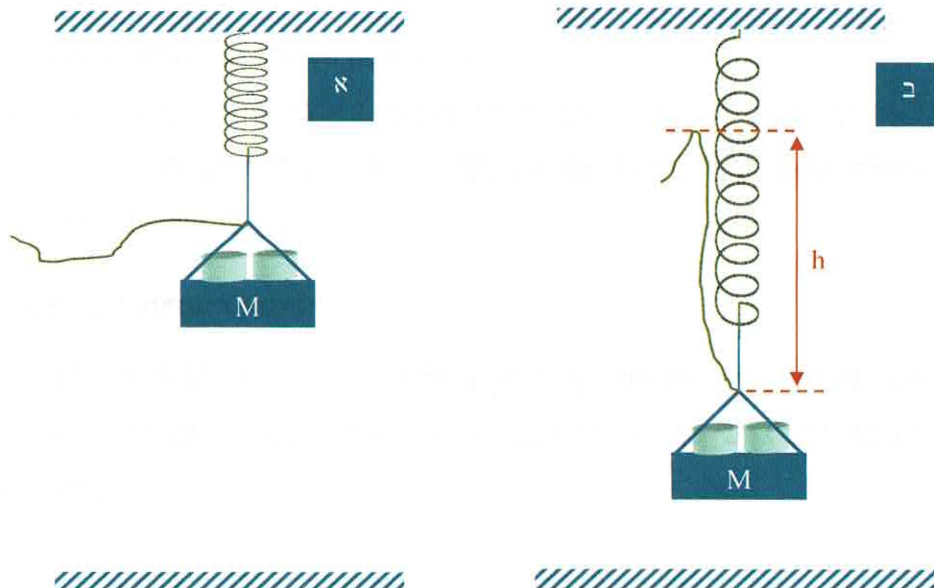
משקל הסלסילה G (גר"כ)	אורך הקפיץ L_n (ס"מ)	התארכות הקפיץ $\Delta L_n = L_n - L_0$

נבנה גרף, המתאר את התלות של המשקל התלוי על הקפיץ G בגודל התארכות הקפיץ ΔL_n. נחשב את שיפוע הגרף. השיפוע מייצג את קבוע הכוח של הקפיץ k. הסבירו, על סמך איזה ידע ניתן לקבוע את הקבוע של הקפיץ.

חלק ב' – הקשר בין האנרגיה של הקפיץ להתארכותו

נתלה את הסלסילה עם המשקולות על הקפיץ. נסמן ב- G את משקל הסלסילה והמשקולות שבתוכה.

1. נרים את הסלסילה כך, שהקפיץ יהיה רפוי, ונעזוב אותה (תרשים א'). נשחרר את הסלסילה, ונמדוד את המרחק ,שעברה הסלסילה עד הנקודה הנמוכה ביותר. נחזור על הניסוי עם משקולות שונות בהתאם לנתונים שבטבלה.
ניתן למדוד את המרחק שעברה הסלסילה h ע"י חוט, המחובר לקצה התחתון של הקפיץ (או בעזרת פיסת קרטון המחוברת לכן שאת גובהו ניתן להתאים). בזמן ירידת הסלסילה החוט נמשך אחרי הקפיץ, אך הוא אינו חוזר לידינו אחרי הירידה. על סמך זאת נמדוד את המרחק, שעברה הסלסילה עד הנקודה הנמוכה ביותר (תרשים ב').



2. נבצע שלוש מדידות עבור כל G, ונרשום את התוצאות בטבלה, שבה $\overline{\Delta L}$ מציין את שיעור התארכות הקפיץ, השווה לשיעור ירידת הסל h.

$E^{grav} = G \cdot \overline{h}$	$\overline{\Delta L}^2$	$\overline{\Delta L}$ ממוצע	$\overline{h}$ ממוצע	$\Delta L = h_2$ מדידה 2	$\Delta L = h_1$ מדידה 1	G (ניוטון)
						6
						9
						12
						15
						18

3. בנו גרף, המתאר את הקשר בין האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית $E^{elastic}$ לבין ההתארכות $\overline{\Delta L}$. האם קיים יחס ישר בין הגדלים?

4. שרטטו גרף של $E^{elastic}$ כפונקציה של $\overline{\Delta L}^2$. איזה קו קיבלתם? האם הגרף עובר דרך ראשית הצירים? נמקו !

5. חשבו את שיפוע הקו שקיבלתם. מהו הקשר בינו לבין הכוח של הקפיץ, שאותו חישבתם בחלק א' של הניסוי ?

6. בהנחה שכל האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית הומרה לאנרגיה פוטנציאלית של הקפיץ, מהו הביטוי, המתקבל עבור האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ?

7. תארו את גלגולי האנרגיה, שהתרחשו מהנקודה, בה הקפיץ היה רפוי, ועד לנקודה הנמוכה ביותר שהסלסילה הגיע אליה.

8. האם מוצדק לרשום בעמודה השמאלית של הטבלה $E^{grav} = E^{elastic}$? נמקו !

9. תארו בעזרת ניסוי דומה, כיצד ניתן להגיע לביטוי עבור $E^{elastic}$, כאשר קבוע הכוח של הקפיץ משתנה בכל מדידה.

מסקנות מההדגמות והניסוי

1. גודל האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של קפיץ נמצא ביחס ישר לריבוע התארכותו.
2. גודל האנרגיה הפוטנציאלית אלסטית של קפיץ נמצא ביחס ישר לקבוע הכוח של הקפיץ.

את שתי המסקנות ניתן לסכם:

האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ נמצאת ביחס ישר לקבוע הכוח שלו ולריבוע התארכותו(או כיווצו)

מהחישוב המדויק של עבודת הכוח האלסטי מקבלים שמקדם, היחס הוא $\frac{1}{2}$. כלומר, הביטוי המתמטי

עבור אנרגיה פוטנציאלית אלסטית של קפיץ הוא: $E^{elastic} = \frac{1}{2}k \cdot (\Delta L)^2$.

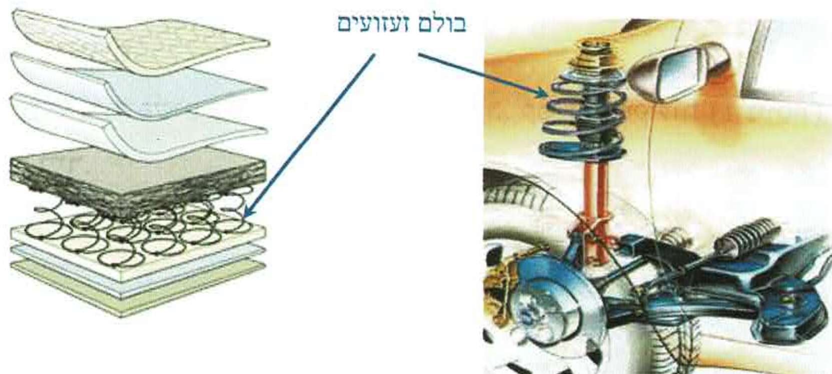
אם נמדוד את התארכות הקפיץ במטרים ואת המשקל בניוטונים, נקבל שהיחידות של קבוע הקפיץ

הן: $\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$.

ניצול האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ

לאנרגיה פוטנציאלית אלסטית שימוש רב גוני בחיי היום- יום במדע ובטכנולוגיה. נסקור כמה כיוונים בולטים וחשובים:

שימור האנרגיה אינו מאפשר **בלימה** מיידית של הגוף הנע. הדרך "לבטל" את האנרגיה הקינטית יכולה להיות המרה לאנרגיה אלסטית באמצעות קפיצים. האנרגיה האלסטית יוצרת תנודות בקפיצים וחימומם. כך מתפזרת אנרגיה קינטית רבה של הגוף הנע. באופן זה פועלים בולמי הזעזועים במכונית, בדלתות, בגלגלי מטוסים וגם במזרוני קפיצים. כך עוצרים מטוס, כאשר הוא נוחת במסלול קצר במיוחד, כמו על סיפון של נושאת מטוסים בים.



א. פתרון טכנולוגי לשינוי כיוון התנועה של גוף כלשהו ניתן לבצע תוך שימוש בקפיץ. במקרה זה הקפיץ משמש מאגר זמני של אנרגיה, ומחזיר אותה לגוף תוך **שינוי כיוון התנועה** לאחר ההתנגשות עם גוף מסיבי יותר. תהליך זה מתרחש, כאשר קופצים על הטרמפולינה, וכאשר כדור מתנגש בקיר.



ב. משמשים בקפיצים כ"**מאגר כוח דוחף**" מניע גופים. כך פעל השעון המכאני (השעון שמותחים אותו) כבר במאה ה-17. כך עבדו הפטפונים הראשונים, כלי מלחמה בעבר הרחוק (בליסטראות). כך עובדים צעצועים נעים, מכונות גילוח, כלי ירי, דלתות נסגרות, ברגים קפיציים, עטים כדוריים וכד'.



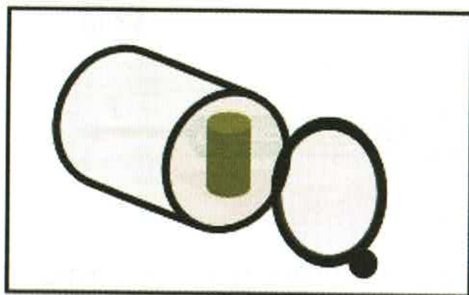
ניסוי חקר של אנרגיה פוטנציאלית אלסטית (קפיצית)



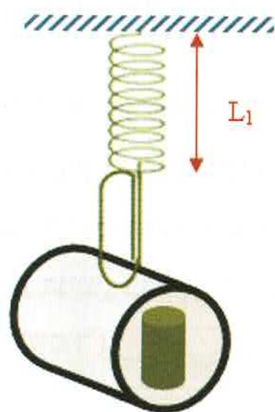
לכל תוצאה בפיזיקה ניתן להגיע במספר דרכים: קיבלנו ביטוי מתמטי עבור האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של קפיץ, במצב בו אנרגיה פוטנציאלית כובדית הומרה לאנרגיה פוטנציאלית אלסטית. עתה ננסה להגיע **לאותו ביטוי**, כשהפעם אנרגיה פוטנציאלית אלסטית עוברת לאנרגיה פנימית בליווי התפשטות חום. הדבר מתרחש תוך כדי עבודת כוח החיכוך של גוף, הנגרר באמצעות קפיץ. תהיה זו, אפוא, בדיקה בלתי תלויה של התוצאה, שקיבלנו.

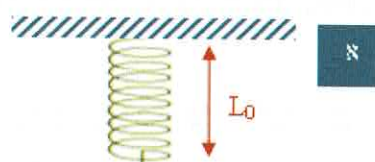
הניסוי דורש ציוד פשוט מאוד: קופסת צילום ריקה, קפיץ, משקולות (1 ניוטון), חוט, סרגל, משטח נייר.

חלק א' – מציאת קבוע הכוח של קפיץ



1. ניקח קופסה ריקה של סרט צילום, ובגובה של 1 ס"מ מתחתית הקופסה נקב שני חורים, במרחק של כחצי ס"מ זה מזה. נשחיל דרכם מהדק משרדי.
2. נכניס לתוך הקופסה משקולת G של 1 ניוטון, ונסגור את המכסה.
3. נתלה את הקפיץ על כן, ונמדוד את אורכו של הקפיץ במצבו הרפוי – L_0 (תרשים א').
4. נתלה בקצה של הקפיץ את הקופסה באמצעות המהדק, ונמדוד את אורכו החדש של הקפיץ – L_1 (תרשים ב').

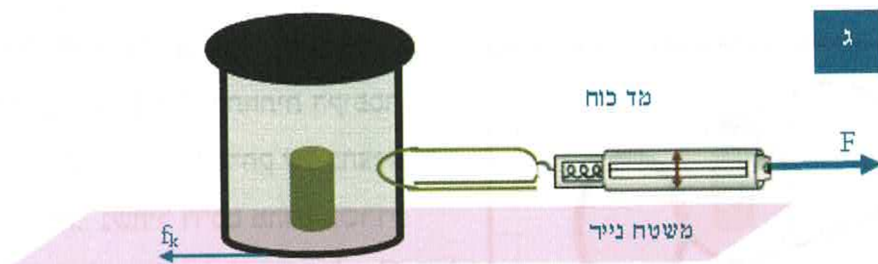




5. נמצא את קבוע הכוח של הקפיץ לפי חוק האלסטיות של הוק. (על מנת לדייק יותר בחישוב של קבוע הקפיץ, ניתן לחזור על החישוב עם מדידה של התארכות הקפיץ על ידי משקולת נוספת.)

חלק ב'– מציאת כוח החיכוך הקינטי

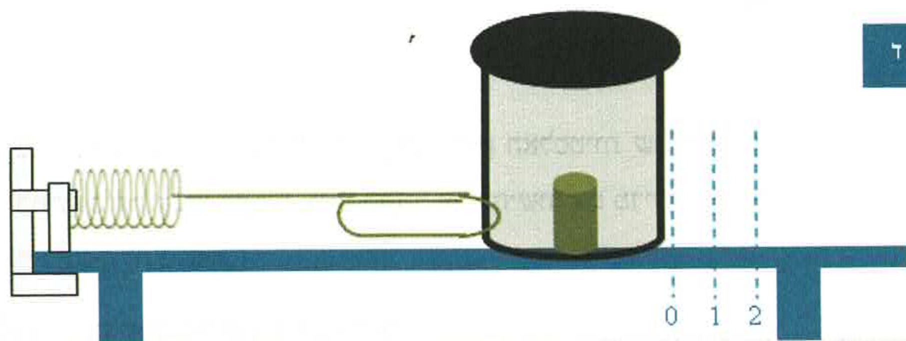
1. נדביק משטח נייר על השולחן, ונניח עליו את הקופסה.
2. נחבר מד כוח למהדק, ונמצא את גודל הכוח F, הנדרש כדי לגרור את הקופסה בקצב קבוע.



3. במצב זה של תנועה פועלים על הקופסה שני כוחות, בכיוון המקביל למשטח: כוח F והחיכוך הקינטי f_k . הואיל והקופסה אינה משנה את מצב תנועתה, שני כוחות אלה משתווים בגודל: $F= f_k$.

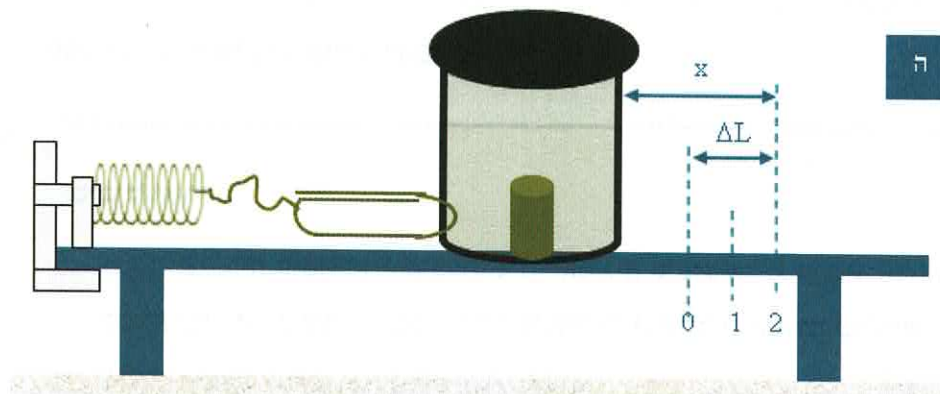
4. **חלק ג' – הקשר בין אנרגיה של קפיץ לעבודת החיכוך**

- נניח את הקופסה על הנייר, ונקשור את הקפיץ למהדק באמצעות חוט שאורכו כ-60 ס"מ.
- אל הקצה השני של הקפיץ נקשור את הכליבה בגובה של כ-1 ס"מ מהשולחן.
- נרחיק את הקופסה מהקפיץ, עד שהחוט והקפיץ יהיו ישרים, אך כמעט לא מתוחים. במצב זה נסמן ב-0 את מיקומו של הדופן האחורי של הקופסה, הרחוק מן הקפיץ. על שטח הנייר, בהמשך לחוט, נרשום סקלה, שראשיתה בנקודת 0, ויחידותיה 1 ס"מ (תרשים ד').



- נמתח את הקפיץ על ידי משיכת הקופסה עד אחת השנתות, ונחזיק את הקופסה. נרשום את שיעור ההתארכות ΔL בטבלה.

- נשחרר את הקופסה ונסמן את מקום עצירתה, לאחר שתנוע. נמדוד את המרחק x, שעברה הקופסה ממקום שחרורה עד מקום העצירה (תרשים ה').



נחזור על מדידת המרחק x שלוש פעמים, כאשר בכל מדידה נשחרר את הקופסה מאותו מקום. את תוצאות המדידה נרשום בטבלה.

ΔL	x_1 מדידה 1	x_2 מדידה 2	x_3 מדידה 3	$\bar{x}$ ממוצע	$\overline{\Delta L}^2$	$W_{fk}=f_k \cdot \bar{h}$

- נחזור על הניסוי עבור ארבעת שיעורי ΔL שונים, ונשלים את הטבלה.
- תארו במילים את תהליכי המרה של האנרגיה בניסוי זה.
- באחת העמודות בטבלה התבקשת למלא את המכפלה $F_{kin}^{fr} \cdot x$, שהיא עבודת כוח החיכוך. מדוע אפשר להסיק, שעבודת כוח החיכוך שווה לאנרגיה האלסטית של הקפיץ?
- סרטטו גרף של $E^{elastic}$ כפונקציה של $(\Delta L)^2$. איזה קו קיבלת? האם הוא עובר דרך ראשית הצירים?
- חשבו את שיפוע הקו, שקיבלתם. השוו בין גודל השיפוע לבין קבוע הקפיץ, שחישבתם בחלק א' של הניסוי.

- בהנחה שכל האנרגיה האלסטית של הקפיץ שווה לעבודת כוח החיכוך, מהו הביטוי לאנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ?
- השוו את הביטוי של האנרגיה האלסטית לביטוי שאליו הגענו בניסוי הקודם? מהי המסקנה? אילו גורמים יכולים להשפיע על ההשוואה?

סיכום הפרק

1. עבודה של כוח פוטנציאלי קובעת שינוי אנרגיה פוטנציאלית מהסוג המתאים: עבודה של כוח כבידה קובעת אנרגיה פוטנציאלית כובדית, עבודה של כוח אלסטי קובעת אנרגיה פוטנציאלית אלסטית.
2. עלייה באנרגיה פוטנציאלית כובדית מתקבלת מביצוע עבודה נגד כוח הכובד. ירידה באנרגיה זו מתקבלת, כאשר כוח הכובד מבצע עבודה חיובית.
3. שינוי באנרגיה פוטנציאלית כובדית תלוי בגודל כוח הכובד, במקום המדידה ובהפרש הגבהים, בהם מצוי הגוף. שינוי באנרגיה פוטנציאלית כובדית אינו תלוי בבחירת רמת הייחוס, באורך המסלול ובצורתו.
4. ביטוי מתמטי לאנרגיה פוטנציאלית כובדית הוא:

$$E^{grav} = G \cdot h$$

G - כוח הכובד (משקל מנוחה).

H - הגדלת הגובה של הגוף, המורם יחסית לרמת הייחוס.

E^{grav} - האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית.

5. אנרגיה פוטנציאלית אלסטית מתקבלת תוך ביצוע עבודה נגד הכוח האלסטי של הקפיץ.
6. אנרגיה פוטנציאלית אלסטית, הנאגרת בתוך קפיץ, תלויה בקבוע הכוח של הקפיץ ובריבוע התארכותו:

$$E^{elastic} = \frac{1}{2} k \cdot (\Delta L)^2$$

K – קבוע של הקפיץ,

ΔL – התארכות הקפיץ יחסית למצבו הרפוי.

$E^{elastic}$ – אנרגיה פוטנציאלית אלסטית.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1) ממעלה מסילה חלקה שגובהה h משחררים גוף, שמסתו m. האם נכון ש:

א. הגוף יעלה בצידה השני של המסילה לגובה נמוך יותר?

ב. הגוף יעלה בצידה השני של המסילה לגובה רב יותר?

ג. הגוף יעלה בצידה השני של המסילה לגובה זהה לזה, שממנו הוא שוחרר?

ד. לא ניתן לדעת לאיזה גובה יעלה הגוף?



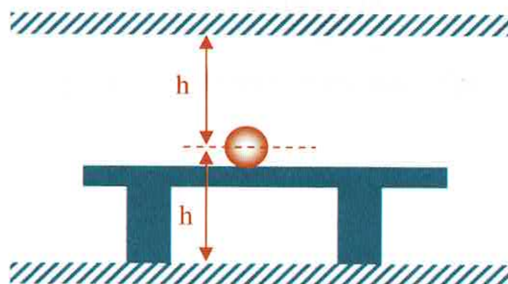
2) כדור שמסתו m מונח על שולחן. מרכז הכדור נמצא במרחק h מטר מהרצפה ו-h מטר מהתקרה (כמתואר בתרשים). האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית שיש לכדור היא:

א. אפס, כאשר מישור הייחוס הוא השולחן.

ב. mgh כאשר מישור הייחוס הוא הרצפה.

ג. mgh – כאשר מישור הייחוס הוא התקרה.

ד. כל התשובות נכונות.



3) גוף נורה אנכית כלפי מעלה, פעם על פני כדור-הארץ ופעם על פני הירח. ידוע, שחוזק הכבידה על הירח הוא , בקירוב, פי 6 קטן מזה של כדור הארץ: $\frac{g}{6}$ ארץ $= g'$ ירח.

אם בשני המקרים מקנים לגוף אותה כמות אנרגיה התחלתית, הגובה שאליו יגיע הגוף על פני הירח יהיה:

א. גדול פי 6 מאשר על פני כדור-הארץ.

ב. קטן פי 2 מאשר על פני כדור-הארץ.

ג. זהה לגובה, אליו הגיע על פני כדור-הארץ.

ד. גדול פי 36 מאשר על פני כדור-הארץ.

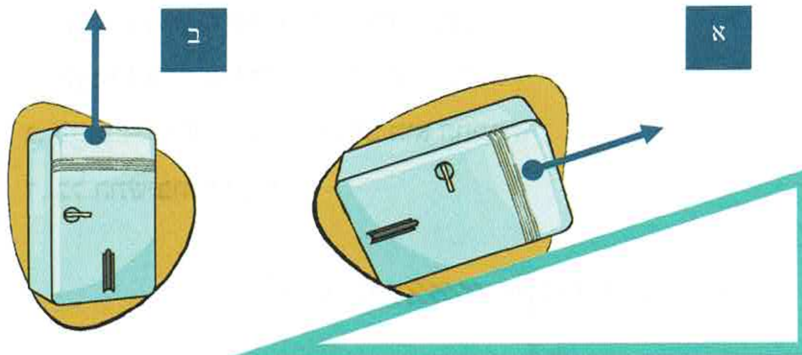
4) אפשר להעמיס מקרר על משאית באמצעות מישור משופע (מצב א') או בהרמה ישירה (מצב ב'). האם נכון ש:

א. הכוח, שיש להשקיע בהרמת הארגז, יהיה גדול יותר במצב ב'?

ב. המרחק, שלאורכו פועל הכוח גדול יותר במצב א'?

ג. העבודה, שיש להשקיע שווה בשני המקרים?

ד. כל התשובות נכונות?



5) גוף שמסתו m נופל מגובה h ונצמד לרצפה. האם נכון ש:

א. בזמן הפגיעה בקרקע כל האנרגיה הופכת לאנרגיה חום?

ב. כמות האנרגיה, שהפכה לאנרגיית חום, שווה ל- mgh?

ג. עבודת כוח הכובד שווה בגודלה לאנרגיית החום, שנוצרה?

ד. כל התשובות נכונות?

6) האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של קפיץ נמצאת ביחס ישר:

א. להתארכות הקפיץ.

ב. לקבוע הכוח של הקפיץ.

ג. למסת הקפיץ.

ד. כל התשובות נכונות.

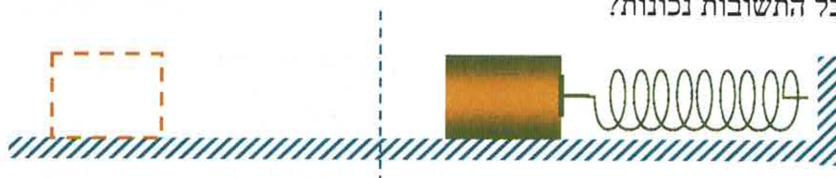
7) בול עץ המונח, על משטח אופקי לא חלק, נלחץ אל קפיץ אופקי ומכווצו. לאחר שחרורו נהדף הבול מרחק מה, עד שנעצר. האם נכון שעבודת כוח החיכוך:

א. הייתה שווה לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ?

ב. שלילית בסימנה?

ג.הפכה כולה לאנרגיה פנימית (לחום)?

ד. כל התשובות נכונות?



8) כאשר מכווצים קפיץ ב- ΔL מטר, הוא יורה גוף, שמסתו m, לגובה של h מטר. אם נכווץ את הקפיץ פי 3 יותר, הוא יירה את הגוף הזה לגובה של:

א. 3h. ב. 9h. ג. 6h. ד. h.

9) כאשר מכווצים קפיץ ב- ΔL מטר, הוא יורה גוף, שמסתו m, לגובה של h מטר. אם נכווץ את הקפיץ פי 3 יותר, הוא יירה גוף, שמסתו 2m לגובה של:

א. 2h. ב. 9h. ג. 1.5h. ד. 4.5h.

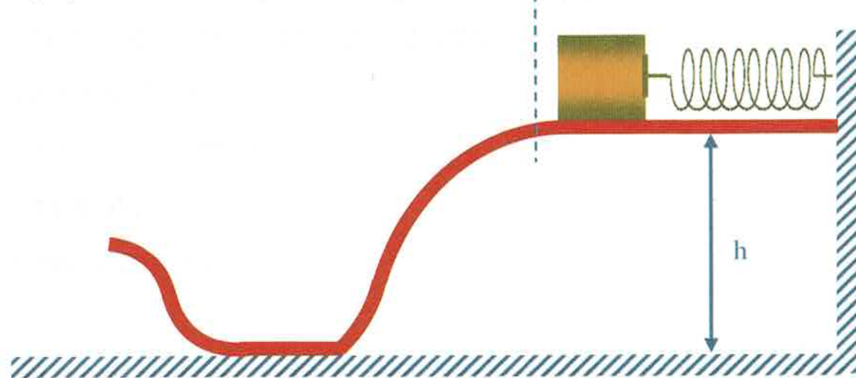
10) מסה m מכווצת קפיץ, הנמצא בגובה h, מעל מסילה חלקה (תרשים). לאחר שנשחרר את הגוף, הוא יעלה בצידה השני של המסילה:

א. לגובה h.

ב. לגובה גדול מ- h.

ג. לגובה קטן מ- h.

ד. לגובה, שיכול להיות קטן או גדול מ- h, תלוי מהו קבוע הכוח של הקפיץ.



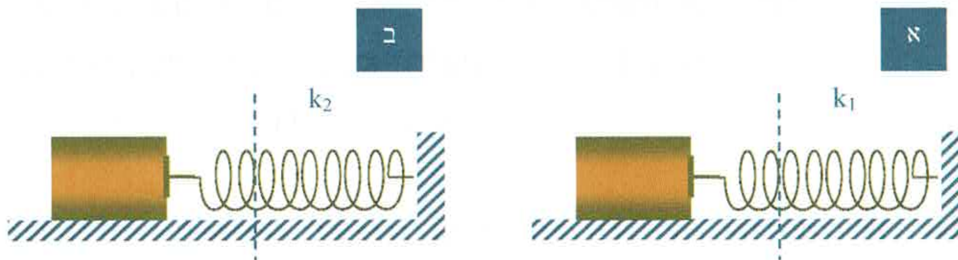
11) לשני קפיצים בעלי קבוע כוח שונה $(k_2 > k_1)$ מקנים אותה התארכות ממצבם הרפוי. האם נכון שהאנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיצים:

א. שווה בשניהם?

ב. גדולה יותר בקפיץ בעל קבוע כוח k_1 (מצב א')?

ג. גדולה יותר בקפיץ בעל קבוע כוח k_2 (מצב ב')?

ד. אינה תלויה בקבוע הכוח של הקפיץ?



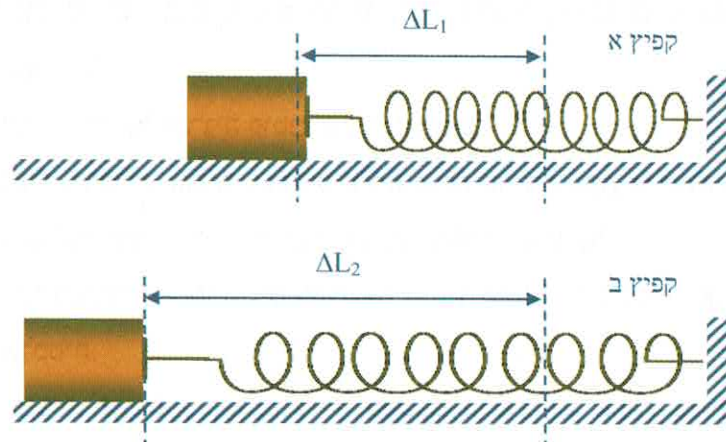
12) שני קפיצים בעלי אותו קבוע כוח מקבלים התארכות שונה ממצבם הרפוי $\Delta L_2 = 2 \cdot \Delta L_1$ (תרשים). האם נכון שהאנרגיה הפוטנציאלית האלסטית:

א. שווה בשני הקפיצים?

ב. גדולה פי 2 בקפיץ ב'?

ג. גדולה פי 4 בקפיץ ב'?

ד. גדולה פי 4 בקפיץ א'?



13) כדי להאריך קפיץ מסויים ב- ΔL מטר, יש להשקיע אנרגיה E, כדי להאריך אותו קפיץ ב- ΔL מטר נוספים, יש להשקיע אנרגיה.

א. גדולה פי 2 (2E).

ב. גדולה פי 3 (3E).

ג. גדולה פי 4 (4E).

ד. זהה לזו, שהשקענו בהתחלה E.



אנרגיה פוטנציאלית

1. מהם התנאים לכך, שלגוף תהיה אנרגיה פוטנציאלית ?
2. תארו את גלגולי האנרגיה, המתרחשים בהדגמות מס' 1 ומס' 2, העוסקות באנרגיה פוטנציאלית כובדית.
3. האם במקרה של שני גופים, הנמצאים באותו גובה, מדובר באותה כמות אנרגיה פוטנציאלית כובדית?
4. מתי מופיע ערך שלילי של אנרגיה פוטנציאלית כובדית?
5. לשני גופים בעלי משקלים שונים מספקים אותה כמות אנרגיה בעת זריקתם כלפי מעלה. מהו הקשר בין משקלי הגופים לבין הגובה, שאליו הם יגיעו?
6. תארו את גלגולי האנרגיה המתרחשים בהדגמות מס' 1 ומס' 2, העוסקות באנרגיה פוטנציאלית אלסטית.
7. האם לשני קפיצים, שנמתחו באותה מידה ממצבם הרפוי, יש אותה כמות של אנרגיה פוטנציאלית אלסטית?
8. האם אנרגיה פוטנציאלית אלסטית נמצאת ביחס ישר להתארכות הקפיץ? מאיזה מקום מודדים התארכות קפיץ?
9. יש הטוענים, שכדור-הארץ הוא "קפיץ מיוחד". הסבירו את טיעונם.
10. השלימו את הטבלה הבאה:

	אנרגיה פוטנציאלית כובדית	אנרגיה פוטנציאלית אלסטית
מהי		
כיצד היא מתקבלת		
הגורמים, בהם היא תלויה		
הביטוי המתמטי		
שימושים יום-יומיים		



שאלות חישוב

אנרגיה פוטנציאלית כובדית

1) כמה אנרגיה כובדית יש לילקוט, שמשקלו במנוחה 2 ניוטון, כאשר הוא נמצא מעל הרצפה בגובה של: א. 1 מטר? ב. 50 ס"מ?

2) כדור, שמסתו 1 ק"ג, מונח על שולח,ן שגובהו 1 מטר. מהי האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הכדור: א. ביחס לרצפה? ב. ביחס לשולחן ?

3) ילדה, שמשקלה במנוחה 500 ניוטון, נמצאת על מגלשה חלקה, שגובהה 8 מטר. מהי האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית, ומהי אנרגיית התנועה, שיש לילדה, כאשר היא נמצאת בגובה של 4 מטר מעל לקרקע (בזמן החלקתה)?

4) שוער בועט כלפי מעלה כדור, שמסתו 200 גרם. בזמן הבעיטה משקיע השוער אנרגיה של 50 ג'ול.

א. לאיזה גובה יגיע הכדור?

ב. אם הכדור היה נבעט באותה עוצמה על הירח, שם חוזק הכבידה קטן פי 6 מאשר על פני כדור-הארץ, לאיזה גובה היה מגיע ? מה הזנחנו בחישוב זה?

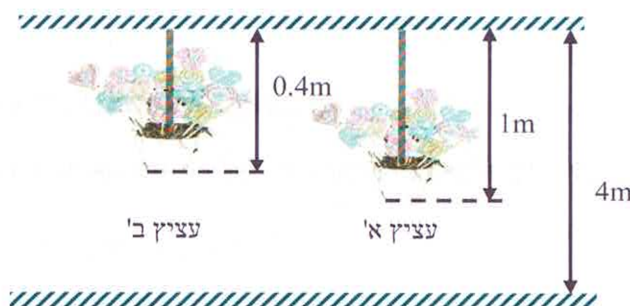
5) שני עציצים קשורים לתקרה באמצעות חוט. גובה התקרה מעל הרצפה הוא 4 מטר. מסת כל אחד מהעציצים היא 0.5 ק"ג. עציץ א' תלוי על חוט, שאורכו 1 מטר. ועציץ ב' תלוי על חוט, שאורכו 40 ס"מ. מהי האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של כל אחד מהעציצים, אם הגובה נמדד יחסית:

א. לרצפה?

ב. לתקרה?

ג. לעציץ א'?

ד. לעציץ ב'?



ה. עבור כל אחד מהמקרים (א'-ד') מצאו מהו ההפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של שני העציצים. מהי מסקנתכם?

6) תלמיד זורק כלפי מטה, מגובה של 1.5 מטר, כדור, שמסתו 300 גרם. הכדור פוגע ברצפה ומוחזר ללא "איבוד" אנרגיה. אם התלמיד השקיע בזריקת הכדור אנרגיה של 20 ג'ול, עד לאיזה גובה יעלה הכדור לאחר פגיעתו ברצפה? (הזנח את התנגדות האוויר).

7) חמישה נערים, שהמשקל במנוחה של כל אחד מהם הוא 500 ניוטון, יורדים ארבע קומות במעלית. גובה כל קומה הוא 5 מטר.

מהו ההפסד באנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הנערים? למה הפכה אנרגיה זו ?

8) תלמיד מבצע את ניסוי החקר באנרגיה פוטנציאלית כובדית (עמ' 250), כשהאנרגיה ההתחלתית שהוא מספק לסלסלה ולמשקולות היא 4 ג'ול. הטבלה מתארת את תוצאות הניסוי, כאשר כל פעם המשקל המורם משתנה:

המשקל המורם G (ניוטון)	גובה העלייה h (ס"מ)	G·h (ג'ול)
4	95	
5	75	
6	64	
8	45	

א. חשבו את מכפלת המשקל המורם בגובה העלייה עבור כל שלב. רשמו זאת בטבלה.

ב. מצאו, עבור כל שלב, בכמה אחוזים קטנה האנרגיה הסופית מהאנרגיה ההתחלתית, שסופקה למערכת.

ג. ציינו את הסיבות האפשריות לכך.

אנרגיה פוטנציאלית אלסטית

9) כמה אנרגיה פוטנציאלית אלסטית נאגרת בקפיץ, שקבוע הכוח שלו $100\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$, אם הוא מתכווץ ב- 10 ס"מ?

10) בכמה מטר מתוח קפיץ, שקבוע הכוח שלו הוא $200\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$, אם האנרגיה הפוטנציאלית, האגורה בו היא 25 ג'ול?

11) כוח של 50 ניוטון גורם לקפיץ להתארך ב- 25 ס"מ. מה תהיה התארכות הקפיץ, כאשר האנרגיה האלסטית הנאגרת בו שווה 100 ג'ול?

12) כדי למתוח קפיץ ב- 4 ס"מ יש להשקיע אנרגיה של 5 ג'ול. כמה אנרגיה יש להשקיע בנוסף על מנת למותחו ב- 8 ס"מ נוספים?

13) כיצד תשתנה האנרגיה האלסטית של קפיץ מכווץ, שקבוע הכוח שלו הוא k וכיווצו ΔL אם:

א. נכפיל את k ו- ΔL יישאר קבוע ?

ב. ΔL יקטן למחצית ערכו ו-k יישאר קבוע ?

ג. נכפיל את k וגם את ΔL?

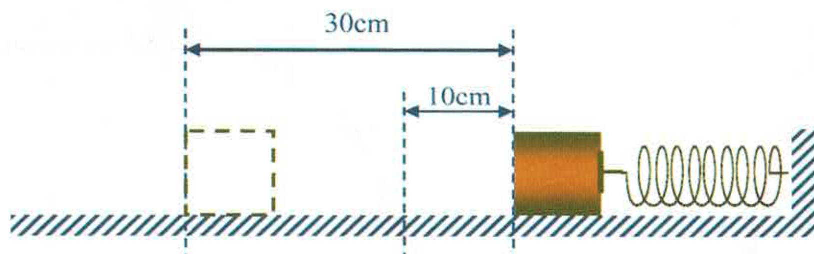
ד. נכפיל את k ונקטין את ΔL פי 2?

ה. נכפיל את ΔL ונקטין את k פי 2?

14) גוף שמשקלו במנוחה 2 ניוטון מכווץ קפיץ בשיעור של 10 ס"מ. ברגע שמשחררים את הגוף, הוא נע 30 ס"מ עד עצירתו. ידוע, שקבוע הכוח של הקפיץ הוא $40 \frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$.

א. מצאו את מקדם החיכוך הקינטי שבין הגוף לבין המשטח.

ב. אם הכיווץ היה גדל פי 2, כיצד היה משתנה המרחק שהגוף עבר?

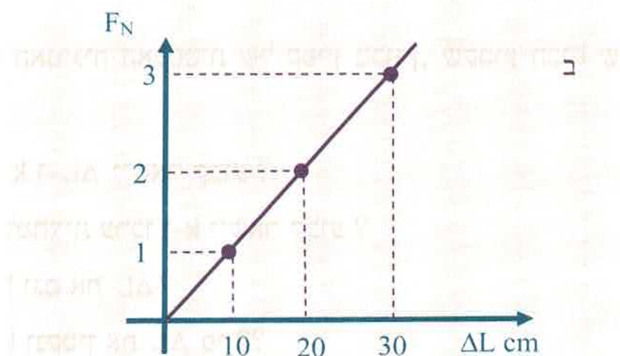


15) הגרף הבא מתאר את הכוח המופעל על ידי קפיץ, בתלות בהתארכותו (ביחס לאורכו הרפוי).

א. מצאו את הקבוע של הקפיץ.

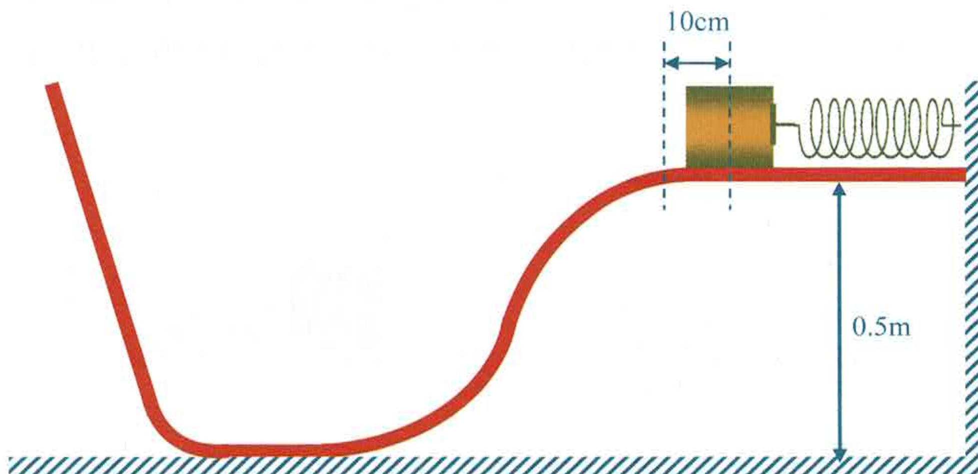
ב. מצאו את השינוי באנרגיה האלסטית של הקפיץ, כאשר הוא נמתח ב- 10 ס"מ ממצבו הרפוי.

ג. מהי העבודה הדרושה להגדלת התארכות הקפיץ מ-30 ס"מ ל- 40 ס"מ?

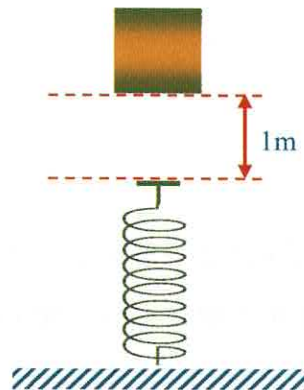


אנרגיה פוטנציאלית – כובדית ואלסטית

16) גוף שמסתו 1 ק"ג מכווץ ב- 10 ס"מ קפיץ, שנמצא בקצה הימני של מסילה חלקה. קבוע הכוח של הקפיץ הוא $k=50\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$. מצאו את הגובה, אליו יגיע הגוף בצד השמאלי של המסילה, לאחר שייהדף על ידי הקפיץ.



17) גוף שמסתו 1 ק"ג נמצא בגובה של 1 מטר מעל קפיץ. כשמשחררים את הגוף, הקפיץ מתכווץ ב- 20 ס"מ. מצא את קבוע הכוח של הקפיץ.



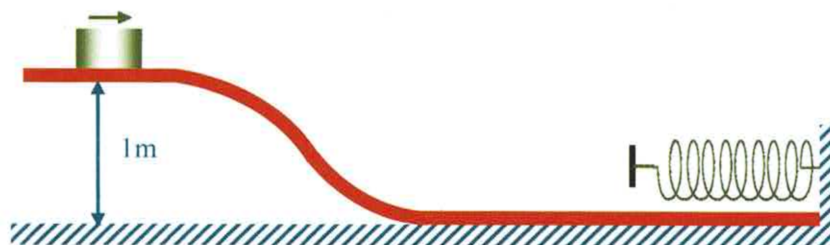
18) כאשר מכווצים קפיץ ב- 10 ס"מ, הוא מסוגל לירות גוף שמשקלו במנוחה 2 ניוטון לגובה של 4 מטר.

א. לאיזה גובה יגיע הגוף, אם הקפיץ יהיה מכווץ ב- 20 ס"מ ?

ב. אם היינו לוקחים גוף, שמשקלו במנוחה 1 ניוטון, לאיזה גובה היה מגיע הגוף כשהכיווץ 10 ס"מ?

19) לגוף שמסתו 100 גרם מקנים אנרגיית תנועה התחלתית של 10 ג'ול. הגוף נע במסילה חלקה שגובהה 1 מטר, כשלתחתית המסילה מחובר קפיץ בעל קבוע כוח של $k = 100 \frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$.

מה יהיה הכיווץ המרבי של הקפיץ, כשהגוף יגיע לתחתית המסילה ?



תשובות

1) א. 2 ג'ול. ב. 1 ג'ול.

2) א. 10 ג'ול. ב. 0.

3) 2000 ג'ול,

4) א. 25 מטר. ב. 150 מטר.

5) א. 15 ג'ול, 18 ג'ול. ב. 5- ג'ול, 2- ג'ול, ג. 0, 3 ג'ול. ד. 3- ג'ול, 0.

ה. 3 ג'ול, תמיד. ההפרש באנרגיה הפוטנציאלית אינו תלוי בבחירת רמת האפס.

6) 8.16 מטר.

7) א. 50000 ג'ול ב. חום בכבל של המעלית.

8) א. 3.8 ג'ול, 3.75 ג'ול, 3.84 ג'ול, 3.6 ג'ול. ב. 5%, 6.25% , 4%, 10%.

9) 0.5 ג'ול.

10) 0.5 מטר.

11) 1 מטר.

12) 40 ג'ול.

13) א. תגדל פי 2. ב. תקטן פי 4. ג. תגדל פי 8. ד. תקטן פי 2. ה. תגדל פי 2.

14) א. 0.33. ב. 1.2 מטר.

15) א. 10N/m. ב. 0.05 ג'ול. ג. 0.35 ג'ול.

16) 0.525 מטר.

17) 600 N/m.

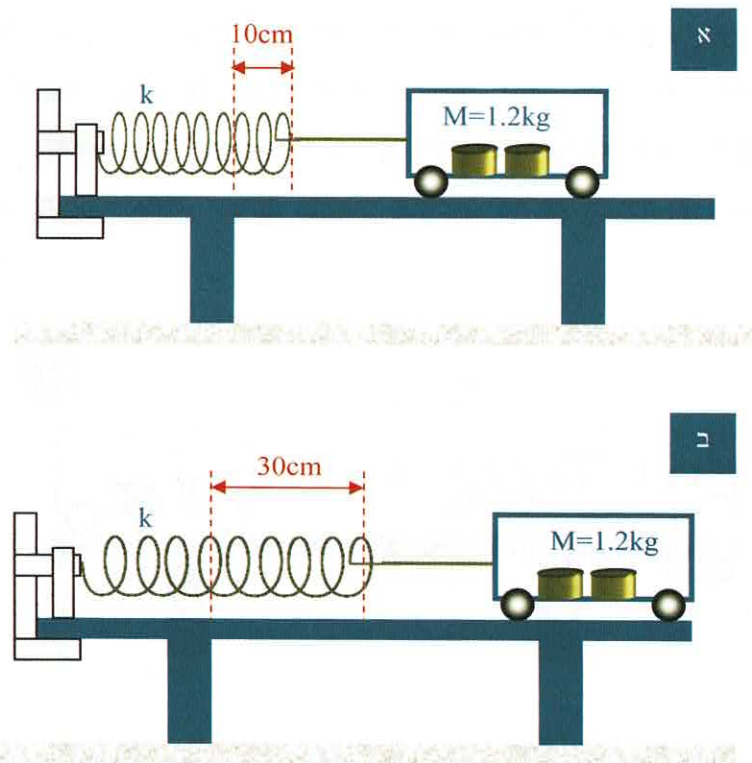
18) א. 16 מטר. ב. 8 מטר.

19) 0.469 מטר.

למדנו, שעבודת כוח, שפעל על גוף, יכולה לגרום לשינוי במצב תנועתו. ניתן להגדיר גודל, שמאפיין שינוי זה של המצב: **אנרגיה קינטית.** חשיבותו של גודל זה נובעת מהאפשרות של המרת אנרגיה זו לסוגים אחרים של אנרגיה תוך כדי ביצוע עבודה, חימום או אופן אחר של אנרגיה, כפי שנדגים בהמשך. תחילה נחקור באמצעות הדגמות, באילו גורמים תלויה האנרגיה הקינטית של גופים.

הדגמה מס' 1

נקשור קפיץ בעל קבוע כוח k אל כליבה המהודקת לשולחן. את קצהו השני של הקפיץ נחבר באמצעות חוט, שאורכו כ- 20 ס"מ, לעגלה, ובה שתי משקולות. המסה הכוללת של העגלה והמשקולות היא 1.2 ק"ג. נרחיק את העגלה למרחק של 10 ס"מ ונרפה ממנה (תרשים א'). הקפיץ יתכווץ בחזרה ויניע את העגלה, שתמשיך לנוע, עד שתגיע לקצה השולחן. אם נחזור ונרחיק את העגלה למרחק של 30 ס"מ (תרשים ב'), נראה, שהעגלה תנוע לאחר ההתכווצות של הקפיץ במהירות גבוהה יותר.



כל התהליך החל בעבודה חיובית שביצענו נגד הכוח האלסטי של הקפיץ. בכך הגדלנו את האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ. כאשר הרפינו מהעגלה, ביצע הכוח האלסטי עבודה חיובית על העגלה, ושינה את מצב תנועתה, כלומר: שינה את האנרגיה הקינטית שלה.

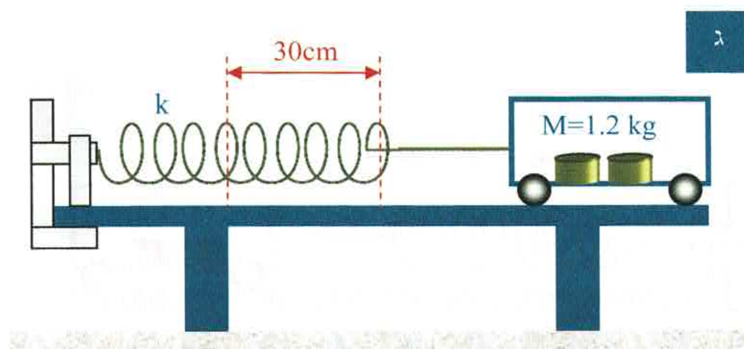
ברור, שבמקרה הראשון ביצענו עבודה קטנה יותר מאשר בפעם השנייה. לכן גם האנרגיה האלסטית של הקפיץ הייתה קטנה יותר, ובהתאם- גם העבודה שהקפיץ ביצע על העגלה. ראינו גם, שמהירות העגלה (שאת מסתה לא שינינו!) הייתה גבוהה יותר בפעם השנייה. הדגמה פשוטה זאת מעידה על כך ש:

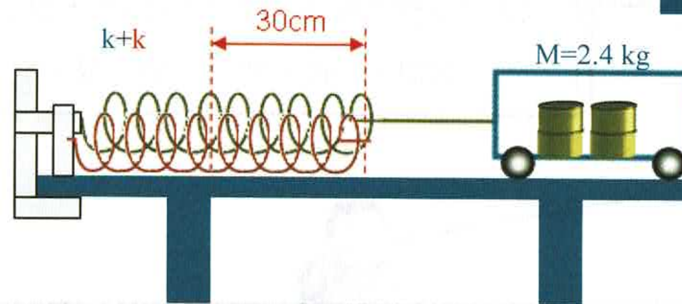
> האנרגיה הקינטית תלויה באופן ישיר במהירות העגלה: $E_{kin} \propto v$

הדגמה מס' 2

נבדוק, אם ישנם **גורמים נוספים**, הקובעים את גודל האנרגיה הקינטית. לשם כך עלינו "להתחכם" כדי לנטרל את השפעת המהירות, שחשיבותה כבר נקבעה. נעשה זאת באופן הבא:

נחזור על ההדגמה הקודמת, כשההתארכות ההתחלתית של הקפיץ תהיה 30 ס"מ (תרשים ג'), וכאשר נבצע את הניסוי בפעם השנייה, נחבר לעגלה שני קפיצים זהים במקביל, וגם נכפיל את מסת העגלה ע"י הוספת משקולות (תרשים ד'). כלומר, השינוי הוא כפול: במקום קפיץ אחד – שניים, ובמקום מסה מסוימת של העגלה (1.2 ק"ג) – מסה כפולה (2.4 ק"ג).





כאשר נבצע את הניסוי במערכת החדשה ונמתח קפיץ בדיוק באותו אורך (30 ס"מ), ניווכח, שמהירות העגלה זהה למהירותה בהדגמה הראשונה (תרשים ג'). ניתן לוודא את התוצאה כאשר מבצעים את שני הניסויים במקביל, זה ליד זה: שתי העגלות ינועו כאילו היו מחוברות, בדיוק באותה המהירות.

ברור שבמקרה השני, כאשר מתחנו את שני הקפיצים במקום קפיץ אחד, בוצעה עבודה נגד שני הקפיצים בו זמנית. הם התארכו באותה מידה, ולכן השינוי ב**אנרגיה הפוטנציאלית** האלסטית היה פי שניים גדול יותר. לאחר שחרור הקפיצים הם פעלו על העגלה ושינו את **האנרגיה הקינטית** שלה בהתאם, כלומר פי שניים יותר מאשר במקרה הראשון. יחד עם זאת, **המהירויות** בשני המקרים היו שוות. מכאן נובע, שהגדלת האנרגיה הקינטית הושגה באמצעות הגדלת מסת הגוף. כלומר, אנרגיה קינטית נמצאת ביחס ישר למסה של הגוף. ואכן, כאשר הוכפלה האנרגיה הקינטית וגם המסה, המהירות נשארה ללא שינוי.

אנו מסיקים ש:

האנרגיה הקינטית פרופורציונאלית למסה של הגוף הנע: $E_{kin} \propto m$

את שתי המסקנות שהשגנו ניתן לחבר ולקבוע ש:

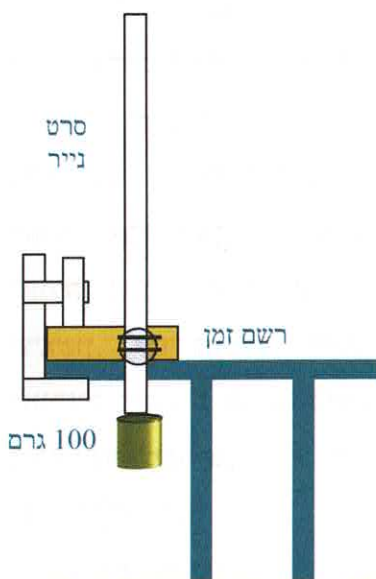
גודל האנרגיה הקינטית נמצא ביחס ישר למסת הגוף, ועולה עם מהירותו.

אין זה מידע מלא על הקשר הכמותי בין האנרגיה הקינטית לבין מהירות הגוף הנע ומסתו.



כדי לקבוע את הקשר באופן מלא יש לבצע ניסוי המלווה בחישוב מדויק.

ניסוי חקר 1 – הביטוי עבור אנרגיה קינטית



הניסוי צריך לגלות את התלות המדויקת של האנרגיה הקינטית בגורמים שאותרו: מסה ומהירות הגוף. לשם כך נעקוב אחר תהליך בו, נאפשר המרה של האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הגוף לאנרגיה קינטית שלו בזמן נפילה חופשית של משקולת. ניתן יהיה להזניח את התנגדות האוויר, ולכן גם את העבודה, שמבצע כוח החיכוך עם האוויר על הגוף. מההשוואה הכמותית בין שינויי האנרגיה הקינטית והפוטנציאלית, נוכל להסיק על הקשר המדויק, אותו אנו מחפשים.

הציוד הנדרש: רשם- זמן עם סרט נייר (המקיש במרווחי זמן של 0.02 שנייה), ספק מתח חילופין (4V-8V), משקולת של 100 גרם.

מהלך הניסוי :

1. ניקח משקולת מתכת בעלת מסה של m השווה ל- 100 גרם.
2. נרכיב את רשם- הזמן על השולחן ונחבר אותו לספק מתח.

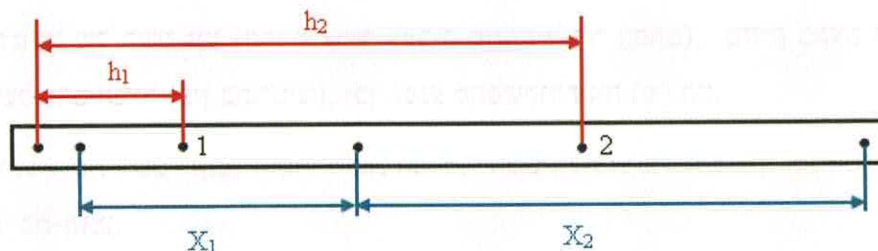
3. נצמיד סרט נייר, שאורכו כ- 80 ס"מ, למשקולת, ונשחיל את הקצה החופשי של הסרט לנתיב של רשם-זמן (הסרט צריך לעבור מתחת לנייר הפחם). נחזיק בקצה החופשי של סרט הנייר (עין בתרשים), וכך נמנע מהמשקולת את נפילתה.

4. נפעיל את רשם- הזמן ונשחרר את הסרט. המשקולת תיפול ותמשוך את הסרט דרך רשם-הזמן.

5. קבלנו סרט נייר, שעליו נקודות, המסמנות את מיקום הסרט, ולכן גם את מיקום הגוף, בזמן נקישות רשם-הזמן. המרחק מהנקודה הראשונה (התחלת הרישום) עד נקודה כלשהי מעיד על המרחק, שעבר הגוף עד זמן מסוים, מרחק הנפילה של המשקולת – h. נמדוד כך את מרחק הנפילה של המשקולת בשבע הזמנים (שבע נקודות על הסרט). כך נתחיל למלא את טבלה הבאה:

	מרחק הנפילה של המשקולת h	עבודת כוח הכובד $W=G \cdot h$	מהירות הגוף (הערכה) V	ריבוע מהירות הגוף V^2
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

6. בשלב זה של עיבוד הנתונים נחשב את מהירויות הגוף בנקודות שבחרנו. כדי להעריך את מהירות הגוף ברגע של נקישה מסוימת (נגיד נקודה 1 בתרשים), נמדוד את המרחק x_1 בין שתי הנקודות הסמוכות לה מימין ומשמאל (נקודה 1 הופכת להיות נקודה פנימית בקטע x_1), ונחלק בזמן שעבר בין נקישות אלה, השווה לשני מרווחי זמן של 0.02 שנייה (0.04 שנייה). ברור, שחישוב זה הוא רק הערכה של מהירות הגוף כי, כפי שמעידות הנקודות על הסרט הפזורים באופן לא אחיד, הגוף אינו נע בקצב קבוע. אולם מרווחי הזמנים הם קטנים דיים כדי שההערכה תהיה מספיק קרובה לאמת. נבצע את ההערכה של מהירות הגוף בשבע נקודות שונות.



חישוב מהירות הגוף בנקודות 1 ו- 2

7. נוכל עתה להשלים את הטבלה על ידי חישוב של העבודה, שבוצעה על ידי כוח הכובד ($W_{grav}= G\cdot h$) בנפילתה של המשקולת. בהזנחת העבודה של כוח החיכוך, עבודה זו תציג את שינוי האנרגיה הקינטית של המשקולת. היות שהגוף התחיל את נפילתו ממנוחה, השינוי באנרגיה הקינטית שווה לאנרגיה הקינטית עצמה: $W_{grav}= E_{kin}$.

8. נבנה גרף, שיתאר את תלות האנרגיה הקינטית E_{kin} (ציר אנכי) במהירות הגוף V (ציר אופקי). האם קיבלתם קו ישר? על מה זה מעיד?

9. עתה נמלא עמודה נוספת בטבלה, ובה ערכי ריבוע המהירות V^2. על סמך נתונים אלה נבנה גרף חדש, שיתאר את תלות האנרגיה הקינטית E_{kin} (ציר אנכי) בריבוע המהירויות V^2 (ציר אופקי). האם קיבלתם קו ישר? האם הקו עובר דרך ראשית הצירים? על מה זה מעיד?

10. נמשיך לנתח את הגרף שקיבלנו. נחשב את שיפוע הגרף, ונשווה אותו עם מסתו של הגוף הנופל. מה ניתן להסיק מהשוואה זו לגבי הביטוי עבור האנרגיה הקינטית?

11. בשלב זה קיבלנו את הביטוי עבור האנרגיה הקינטית. רשמו את שלבי ההמרה של האנרגיה בניסוי זה.

12. לו היינו מבצעים את הניסוי עם משקולת כבדה יותר, האם התוצאות עבור המהירויות היו משתנות? האם שיפוע הגרף E_{kin} כפונקציה של ריבוע של המהירות V^2 היה משתנה?

מסקנות מהניסוי

נסכם את הניסוי, שבוצע, על ידי ציון הנקודות המרכזיות שלו. בניסוי, עבודתו של כוח הכובד גרמה לשינוי במצב תנועתו של הגוף, המאופיין על ידי האנרגיה הקינטית, שבאופן כמותי ניתן לרשום אותה באמצעות הביטוי: $W_{grav} = \Delta E_{pot}$. על סמך ההשוואה בין השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של הכבידה לבין שינוי באנרגיה הקינטית $\Delta E_{pot} = \Delta E_{kin}$ וניתוח התלות של שינוי זה בריבוע המהירות של הגוף הנופל, יכולנו לאמת את הביטוי עבור האנרגיה הקינטית של הגוף הנופל, שצורתו:

$$E_{kin} = \frac{m \cdot V^2}{2}$$

m – מסת הגוף (נמדדת בקילוגרמים).

V – מהירות הגוף (נמדדת במטר/שנייה).

E_{kin} – אנרגיה הגוף (נמדדת בג'ול).

אין זה הכרחי לקבל את הביטוי על סמך המרה של אנרגיה פוטנציאלית כובדית. על מנת להראות זאת ניתן לבצע ניסוי נוסף, ובו במקום המרת האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית תהיה המרת אנרגיה פוטנציאלית אלסטית.

ניסוי חקר 2 – אימות הביטוי עבור אנרגיה קינטית

בניסוי זה ננסה לאמת את הביטוי שקיבלנו עבור האנרגיה הקינטית של הגוף בתלות במסה ובמהירות של הגוף. לשם כך נעקוב אחר תהליך, שבו מתרחשת המרה של אנרגיה פוטנציאלית אלסטית של קפיץ לאנרגיה קינטית של גוף, הנדחף על ידי קפיץ.

מההשוואה הכמותית בין שני שינויי האנרגיה נוכל להסיק על הקשר המפורש, אותו אנו מנסים לאמת.

הציוד הנדרש: רשם-זמן עם סרט נייר (רשם-זמן רגיל בעל מרווח זמן של 0.02 שנייה), ספק מתח חילופין (4V-8V), עגלה שמסתה כ-600 גרם, קפיץ אלסטי, ארבע משקולות של 30 גרם כל אחת, כן לתליית משקולות, וחוט משיכה.

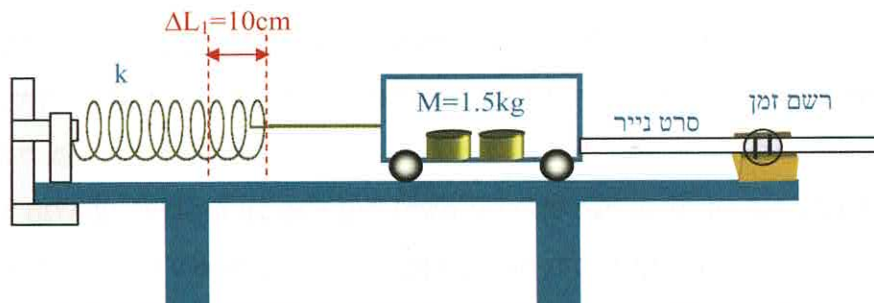
מהלך הניסוי

1. בשלב הראשון של הניסוי נקבע באופן ניסיוני את קבוע הכוח k של הקפיץ. לשם כך נשתמש בקפיץ תלוי, אליו קשורה סלסילה. נמדוד את אורכו ההתחלתי L_0. נשים בתוך הסלסילה את המשקולות, זו אחר זו, ונמדוד את אורכו של הקפיץ L_n, המתאים לכל ערך משקל של הסלסילה. נרשום נתונים אלו בטבלה שלהן.

$\Delta L_n = L_n - L_0$ התארכות הקפיץ	אורך הקפיץ L_n	משקל הסלסילה G

2. נבנה גרף, המתאר את התלות של גודל המשקל התלוי על הקפיץ G (ציר אנכי) בגודל התארכות הקפיץ ΔL_n (ציר אופקי). נחשב את שיפוע הגרף. שיפוע זה מייצג את קבוע הכוח של הקפיץ k. הסבירו באיזה חוק השתמשנו בקביעת k ומדוע.

3. בשלב זה של הניסוי נרכיב את רשם- הזמן בצד אחד של השולחן ונחבר אותו לספק מתח. בצד השני של השולחן נהדק כליבה, ואליה נקשור את הקפיץ. את קצהו השני של הקפיץ נחבר, באמצעות חוט שאורכו כ- 30 ס"מ, אל עגלה שבה שלוש משקולות. מסת העגלה ביחד עם המשקולות היא M (1.5 ק"ג). סרט נייר, הקשור לעגלה, יעבור דרך רשם-זמן (עיין בתרשים).



4. נרחיק את העגלה לכיוון רשם- הזמן כשהתארכות הקפיץ ΔL_1 היא של 10 ס"מ. נפעיל את הרשם ונשחרר את העגלה. לאחר עצירת העגלה נפסיק את פעולת רשם- הזמן. קיבלנו סרט שעליו נקודות, המסמנות את מיקום הסרט (וכך גם מיקום העגלה) בזמני הנקישות.

5. נחזור על הניסוי עבור ארבע התארכויות שונות של הקפיץ ΔL_n, כל פעם בהגדלה של 10 ס"מ. כך נקבל סרטים המתעדים את תנועות העגלה עם המשקולות.

6. במסגרת עיבוד הנתונים נאתר, בכל סרט, אזורי נקודות מרוחקים באופן אחיד. ברור, שאזורים אלו מייצגים את תנועת העגלה בקצב קבוע. את מהירות התנועה נמצא בחלוקה של המרחק בין הנקודות בפרק זמן שעבר בין הנקישות (0.02 של שנייה). כך נקבל את ערך מהירות התנועה בה היא נעה בקצב קבוע בכל אחד מחמשת הסרטים. (כדאי להשתמש בנקודות הראשונות לאחר התייצבות המהירות. נמקו זאת.)

	ההתארכות ההתחלתית של הקפיץ L_n	ΔL_n^2	$E^{elastic} = \frac{k \cdot (\Delta L)^2}{2}$	מהירות קבועה של העגלה V	ריבוע מהירות העגלה V^2
1					
2					
3					
4					
5					

7. כאמור, בהזנחת עבודת כוח החיכוך ניתן לטעון, שהאנרגיה הפוטנציאלית האלסטית $E^{elastic}$ הומרה כולה לאנרגיה קינטית של העגלה E_{kin}. לאחר השלמת הטבלה נבנה גרף, המייצג את תלות האנרגיה הקינטית של העגלה E_{kin} (ציר אנכי) במהירות הקבועה של העגלה V. האם התקבל גרף בצורת קו ישר? על מה מעידה תוצאת הגרף?

8. עתה נבנה גרף, שמייצג את תלות האנרגיה הקינטית של העגלה E_{kin} (ציר אנכי) בריבוע המהירות הקבועה של העגלה V^2 (ציר אופקי). האם התקבל גרף בצורת קו ישר? על מה זה מעיד? האם הגרף עובר דרך ראשית הצירים? על מה זה מעיד?

9. נמשיך לנתח את הגרף. נחשב את שיפוע הגרף ונשווה אותו למסת העגלה עם המשקולות m. מה ניתן להסיק מהשוואה זאת? רשמו את הביטוי עבור האנרגיה הקינטית, כפי שמתקבל מניתוח זה של נתוני הניסוי.

10. הביטוי עבור האנרגיה הקינטית התקבל הפעם על סמך שיקולי אנרגיה, הכוללים מעברי עבודה של הכוח האלסטי. חזרו ותארו את הניסוי בשפת עבודה ואנרגיה.

חשיבותה של האנרגיה הקינטית

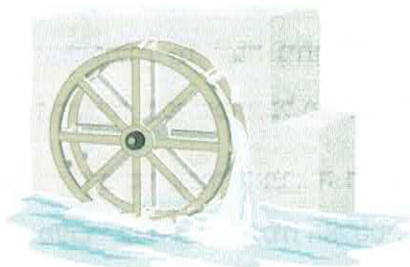
אחד מן הדברים החשובים ביותר שטוענת הפיזיקה הוא, שהתנועה היא מושג יחסי בלבד. עם זאת, בחיי היום-יום אנו מבדילים בין מקרים, בהם אנו מציינים אם גוף מסוים **נע** או **נח**. למה, אם כן, הכוונה?

נציין בנוסף, שבאופן טבעי אנחנו מתייחסים אל הגופים הנעים ביתר "כבוד" וביתר "זהירות" מאשר לגופים הנחים, כאילו הם טעונים במטען התנועה. כך אכן חשבו על התנועה, כייחוד של הגופים הנעים, רק לפני כשלוש מאות שנה, ואף נתנו למטען זה שם מיוחד – "אימפטוס". הסיבה היא פסיכולוגית: ברוב מצבי היום-יום מדובר בתנועה ובמנוחה יחסית לכדור- הארץ. לא ניתן להתעלם מהחשיבות הקובעת של הייחוס כלפי כדור הארץ. ייחוס זה הוא הטבעי ביותר בתיאור החיים שלנו, ולכן מתכוונים אליו, אפילו אם אין מציינים עובדה זו. כך נגרם מצב, שלמעשה, במיוחד במסגרת לא מדעית, בוטלה היחסיות של תנועת הגופים, ובאותו זמן למושג "גוף מצוי במנוחה" הופיעה משמעות מוחלטת.

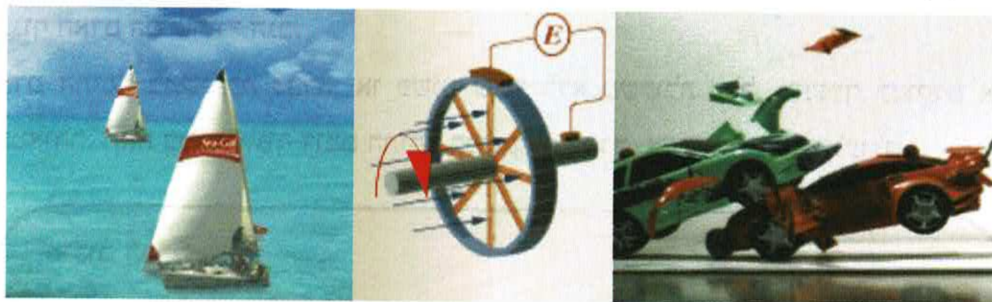
ה"כבוד" שאנו רוחשים לגופים הנעים נובע מהבנה מבוססת ניסיון, שאם נרצה לעצור גוף נע, כאשר אנו בעצמנו עומדים על הקרקע, נצטרך להתאמץ ולהשקיע עבודה, או במילים אחרות: כאשר גוף נע יחסית לקרקע ונבלם מסיבה כלשהי, הוא מפעיל כוח על הגורם, הבולם אותו, ומשפיע במידה זו או אחרת נגדו. מידת ההשפעה על הגורם הבולם היא בדיוק אותה אנרגיה קינטית של הגוף יחסית לקרקע E_{kin}, המקבלת את ביטויה בעבודה של הכוח W_F. במקרה של עצירה מוחלטת נקבל ביצוע עבודה בגודל של האנרגיה הקינטית $E_{kin} = \frac{m \cdot V^2}{2}$ (כאשר V היא מהירותו של הגוף הנע ו- m – מסתו).

כך בסביבתנו הטבעית אנו מעריכים יכולת הטמונה במים זורמים, ברוח נושבת, במכונית נעה או בכדור שעף, ובו בזמן מתעלמים מהאנרגיה הקינטית העצומה, שקיימת הודות לתנועה המהירה מאד שלנו יחד עם כדור- הארץ במסלולו סביב השמש.



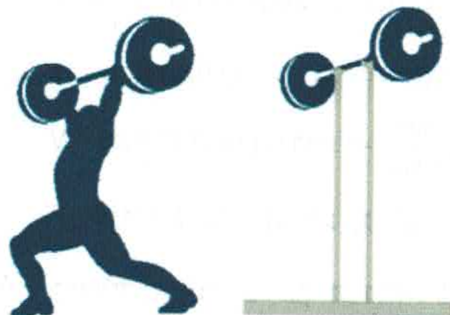


בחלק מן המקרים אפשר להשתמש ב"עבודת העצירה" ולהפיק ממנה תועלת רבה מאוד: תחנות כוח שעוצרות מים או רוח וגורמים להמרה של אנרגיה קינטית לאנרגיה חשמלית, אוניות מפרשים בהן אנרגיה קינטית של רוח עוברת להיות אנרגיה קינטית של האוניה, המכונות שקודחות, חופרות, שוברות (בהם אנרגיה קינטית של הכלי עוברת המרה לאנרגיה פנימית של הגוף המהווה מטרה לפעולה). עם זאת, במקרים אחרים עבודת העצירה מאיימת ועלולה להזיק, להרוס ולפגוע (זה קורה לדוגמה, כאשר שולחים פגזים, כדורים, טילים, וכאשר מתנגשות מכוניות). כלומר, כמו תמיד בפיזיקה, "מועיל" או "מזיק", תלוי באדם עצמו.





בסוף נציין, שלפעמים אין אנו רואים ממש את דרך הבלימה של התנועה, ולכן איננו מודעים לעבודת העצירה, שמתבצעת בבלימה זו. זהו המקרה של מאמצים "סטטיים", המופעלים על ידי שרירי האדם (או החיה).



בפרק "עבודה ואנרגיה" תיארנו מקרה כזה, כאשר תארנו אדם, שתומך במשקולת כבדה. לכאורה, הגוף הכבד של המשקולת אינו זז, והעבודה, לפי הגדרתה, אינה מתבצעת. אולם אין זה המצב האמיתי. במציאות קיימות רעידות של שרירים. הן

מתרחשות ללא שליטת המחשבה שלנו: כל הזמן, ללא הפסקה, גם אם אין הדבר בולט לעין. כתוצאה מכך המטען (המשקולת) יורד, נבלם, מורם מחדש כלפי מעלה וחוזר חלילה. כך מבצעים השרירים עבודה, המצטברת לכמויות גדולות מאד. מתפתחת עייפות, ומתבצעת, כמובן, המרה של אנרגיה פנימית בתוך השרירים (בתגובות כימיות שונות). לכן, האדם שמחזיק את המשקולת מתעייף, ובמוקדם או מאוחר, אם ימשיך להחזיקה, "יישבר" ויוריד את המשקולת. לא כך המצב כאשר התמיכה היא מגוף דומם; תמיכה זו יכולה להימשך ללא הגבלת זמן. תהליך דומה מתרחש בעמידה ממושכת (שלפעמים נגמרת בקריסת העומד דום בזמן ממושך). השרירים העמידים ביותר למאמץ ה"סטטי" בגוף האדם הם שרירי הגב.

אדם התומך במשקולת כבדה, או פשוט עומד ללא משקולת כלל, מתעייף במוקדם או במאוחר. זאת בניגוד לגוף דומם התומך במשקולת כבדה, אשר לא יתעייף לעולם.

סיכום הפרק

- אנרגיית התנועה, או האנרגיה הקינטית, מהווה אפיון מצב התנועה.מאחר והתנועה היא מושג יחסי, גם האנרגיה הקינטית היא מושג יחסי בלבד. כאשר אין מציינים את גוף הייחוס, הכוונה היא בדרך כלל יחסית לקרקע.
- השינוי באנרגיה הקינטית של גוף נובע מעבודה של כוחות שונים, שהופעלו על הגוף.

  לפי ההגדרה ניתן לרשום שיוויון של עבודת הכוח והשינוי באנרגיה קינטית:
  $\Delta E_{kin} = W_F$.
- אנרגיה קינטית נמצאת ביחס ישר למסתו של הגוף ולריבוע המהירות שלו.

  טענה זו מתוארת באופן מתמטי על ידי הנוסחה עבור אנרגיה קינטית:

  $$E_{kin} = \frac{m \cdot V^2}{2}$$

  m - מסת הגוף (נמדדת בקילוגרם),

  V - מהירות הגוף (נמדדת ב- $\frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$),

  E - אנרגיית הגוף (נמדדת בג'ול).
- לתהליך העצירה של גוף נע נלוות עבודה והמרה של אנרגיה קינטית לסוג אחר של אנרגיה $\Delta E_{kin} \Rightarrow W_F \Rightarrow \Delta E$. תהליך זה יכול להיות מועיל או מזיק מאוד.



1) לגוף, שמסתו m ומהירותו V, יש אנרגיה קינטית E_{kin}. אם נקטין את המהירות פי 2, האנרגיה הקינטית:

א. תקטן פי 2.

ב. תקטן פי 4.

ג. תקטן פי 8.

ד. תקטן פי 16.

2) לעגלה אחת מסה m ומהירות V, ולעגלה שנייה מסה 3m ומהירות 3V. היחס בין האנרגיות הקינטיות של שתי העגלות הוא:

א. $\frac{E_2}{E_1}=\frac{27}{1}$ ב. $\frac{E_2}{E_1}=\frac{9}{1}$ ג. $\frac{E_2}{E_1}=\frac{3}{1}$ ד. $\frac{E_2}{E_1}=\frac{18}{1}$

3) כדי לשנות את מהירותו של גוף ממנוחה למהירות V יש להשקיע אנרגיה השווה ל- E. כדי להגדיל את מהירות הגוף ממהירות V למהירות 2V יש להשקיע אנרגיה השווה ל:

א. 2E ב. 3E ג. 4E ד. E

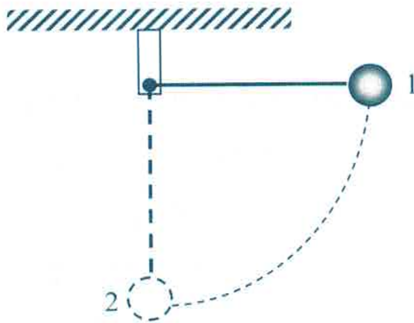
4) גוף בעל אנרגיה קינטית E_{kin} נתקל בקפיץ ונעצר תוך כיווץ הקפיץ ב- ΔL מטר. אם האנרגיה הקינטית ההתחלתית של הגוף הייתה $\frac{1}{9}E_{kin}$ הוא היה גורם לאותו קפיץ כיווץ מרבי של:

א. $\frac{1}{9}\Delta L$ ב. $9\cdot\Delta L$ ג. $\frac{1}{3}\Delta L$ ד. $3\cdot\Delta L$

5) אבן נופלת חופשית – פעם על פני כדור-הארץ ופעם על פני הירח. ($\frac{g}{6}$ ארץ $= g'$ירח). הגובה ההתחלתי של האבן שווה בשני המקרים. אם מהירות הפגיעה בקרקע על פני כדור-הארץ היא V, מהירות הפגיעה בקרקע על פני הירח תהייה:

א. V ב. $\frac{V}{6}$ ג. $\frac{V}{3}$ ד. $\frac{V}{2}$

6) כדור, שמסתו m, קשור לחוט, שאורכו L. הכדור מורם כך, שהחוט נמצא במצב אופקי (נק' 1 בתרשים). כאשר הכדור חולף על פני נק' 2 בתרשים שמהווה גובה הייחוס:



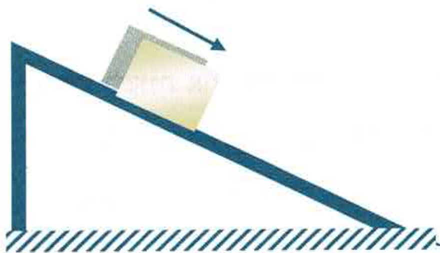
א. מהירותו מרבית.

ב. האנרגיה הקינטית שלו מרבית.

ג. אין לו אנרגיה פוטנציאלית כובדית.

ד. כל התשובות נכונות.

7) גוף מחליק על מישור משופע **במהירות קבועה.** האם נכון ש:



א. אין כל שינוי באנרגיה פוטנציאלית שלו?

ב. האנרגיה הפוטנציאלית שלו הופכת לאנרגיה קינטית?

ג. האנרגיה הקינטית שלו הופכת לחום?

ד. האנרגיה הפוטנציאלית שלו הופכת לחום?

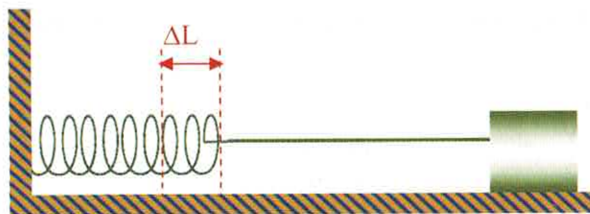
8) גוף שמסתו m מונח על משטח חלק ומחובר לקפיץ אופקי. מותחים את הקפיץ ממצבו הרפוי למרחק ΔL, ומשחררים את המסה. האם נכון ש:

א. במעבר בנקודה, שבה הקפיץ היה רפוי, האנרגיה הקינטית היא מקסימאלית?

ב. כאשר הקפיץ יגיע לכיווץ מקסימאלי מהירות הגוף תהיה שווה לאפס?

ג. בנקודות הקצה, שבהן הקפיץ מתוח או מכווץ מקסימאלית, האנרגיה האלסטית היא מרבית?

ד. כל התשובות נכונות?





אנרגיה קינטית

1. מהי אנרגיה קינטית, ובאלו גורמים היא תלויה?

2. מה אפשר לומר על מהירות תנועתו של גוף, הנע בהשפעת כוחות שונים, כאשר הוא מפסיד אותה כמות אנרגיה שהוא מקבל?

3. גוף נזרק כלפי מעלה. היכן תהיה אנרגיית התנועה שלו מינימאלית והיכן מקסימאלית?

4. גוף קשור לקפיץ ומכווצו. לאחר שנרפה מהגוף, היכן תהיה האנרגיה הקינטית שלו מקסימאלית והיכן מינימאלית?

5. ציינו כמה דוגמאות לניצול אנרגיה קינטית בשימושי יום-יום.

6. האם האנרגיה, שיש להשקיע כדי להגדיל את מהירותו של גוף ממצב של מנוחה למהירות V, שווה לכמות האנרגיה, שיש להשקיע כדי להגדיל את מהירות הגוף ממהירות V למהירות 2V?

7. באמצעות המערכת בה השתמשנו בהדגמות שבפרק זה, כיצד ניתן להראות את הקשר בין המהירות למסה, כאשר אנרגיית התנועה קבועה?

8. משחררים שני גופים בעלי מסות שונות מאותו הגובה. האם הם יגיעו לקרקע באותה מהירות? האם לשני הגופים תהיה אותה אנרגיית תנועה רגע לפני פגיעתם בקרקע?

9. כיצד צריך להרים גוף כלפי מעלה מבלי לשנות את אנרגיית התנועה שלו בזמן ההרמה?

10. המשטרה ממליצה להחמיר עם נהגים, שעוברים על המהירות המותרת. מהי ההצדקה הפיסיקלית לכך?



שאלות חישוב

1) מהי האנרגיה הקינטית של כדור, הנע במהירות של $5 \frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$, אם מסתו היא:

א. 1 ק"ג? ב. 100 גרם?

2) באיזו מהירות נע אופנוע, שמסתו 400 ק"ג, אם האנרגיה הקינטית שלו היא 125000 ג'ול?

3) מהי מסתה של מכונית, הנעה במהירות של $20 \frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$, אם אנרגיית התנועה שלה היא 200,000 ג'ול?

4) כמה עבודה נדרש להשקיע כדי להביא גוף, שמסתו 5 ק"ג, למהירות של $4 \frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$?

א. אם הגוף נמצא במנוחה.

ב. אם לגוף יש מהירות של $2 \frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$.

5) כיצד תשתנה האנרגיה הקינטית של מסה m, הנעה במהירות V, אם:

א. נקטין את m פי 2 ו- V יישאר קבוע?

ב. נקטין את V פי 2 ו- m יישאר קבוע?

ג. נקטין פי 2 גם את V וגם את m?

ד. נקטין את m פי 2 ונכפיל את V?

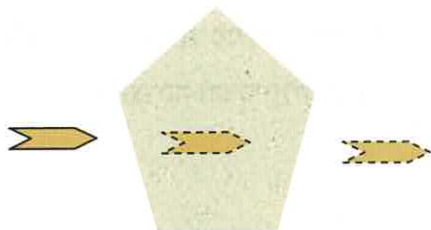
ה. נקטין את V פי 2 ונכפיל את m?

6) קליע, שמסתו 10 גרם, חודר דרך שק חול ויוצא מצידו השני של השק. מהירות הקליע לפני כניסתו לשק הייתה $400 \frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$ ולאחר יציאתו מהשק $100 \frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$.

א. כמה אנרגיה קינטית הייתה לקליע לפני פגיעתו בשק החול?

ב. כמה אנרגיה קינטית הייתה לקליע לאחר יציאתו משק החול?

ג. חשבו את ההפרש בין האנרגיות והסבירו מה קרה לאנרגיה החסרה?



7) קרון, שמסתו 10 טון נע, במהירות של 36 קמ"ש ונעצר בהשפעת כוח החיכוך השווה ל- 3000 ניוטון. חשבו את:

א. כמות העבודה שנעשתה נגד כוח החיכוך.

ב. הדרך שעבר הקרון עד עצירתו.

8) גוף, שמסתו 2 ק"ג, משוחרר ממנוחה מגובה של 80 מטר מעל הקרקע. מיצאו באיזו מהירות יפגע הגוף בקרקע.

9) אבן, שמסתה 1 ק"ג, נזרקת כלפי מעלה במהירות של $30\frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$.

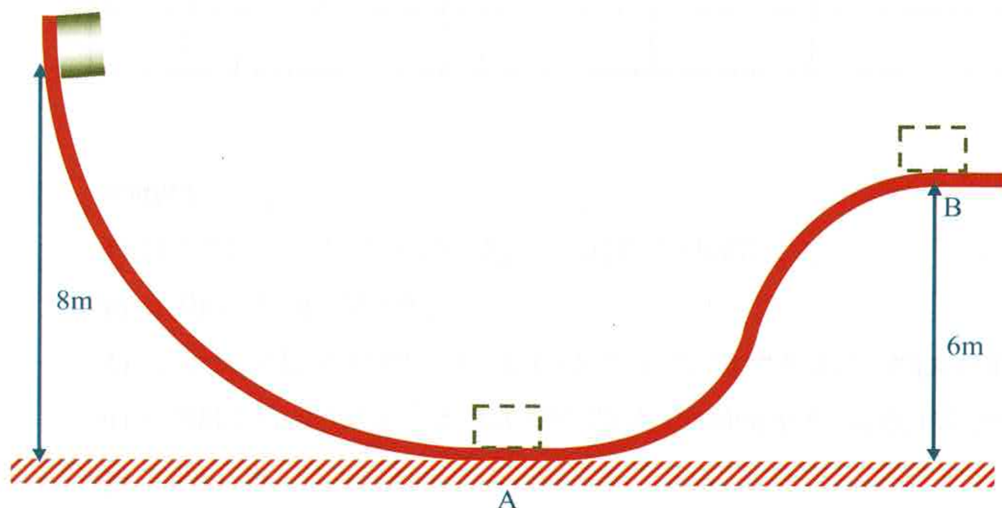
א. מצאו עד לאיזה גובה תגיע האבן?

ב. אם היינו זורקים באותה המהירות אבן, שמסתה כפולה, האם התשובה לסעיף א' הייתה משתנה?

10) גוף מתחיל להחליק ממעלה מסילה חלקה, המתוארת בתרשים. מסתו של הגוף היא 3 ק"ג:

א. מצא את מהירותו של הגוף בנקודות A ו-B .

ב. האם המהירויות בנקודות A ו- B היו משתנות לו מסת הגוף הייתה קטנה יותר?



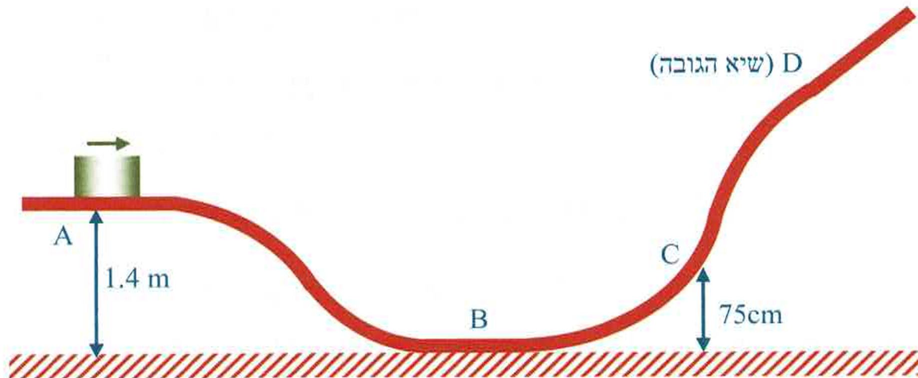
11) גוף, שמסתו 1 ק"ג, מכווץ ב- 20 ס"מ קפיץ, שקבוע הכוח שלו הוא $\frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}100$.

מצא איזו מהירות תהיה לגוף:

א. כשהוא יגיע למקום, בו הקפיץ רפוי.

ב. כאשר הקפיץ עדיין יהיה מכווץ ב- 10 ס"מ.

12) גוף, שמסתו 2 ק"ג, נע כל פני מסילה חלקה. בהיותו בנקודה A יש לגוף אנרגיית תנועה של 36 ג'ול. חשב את מהירותו ואת האנרגיה הקינטית והפוטנציאלית הכובדית שיש לגוף בנקודות A, B, C, D והשלם את הטבלה שלהלן:



	V	E_{kin}	E_{pot}	E כללית
נק' A				
נק' B				
נק' C				
נק' D				

תשובות

1) א. 12.5 ג'ול, ב. 1.25 ג'ול. **2)** 25m/sec **3)** 1000 ק"ג.

4) א. 40 ג'ול, ב. 30 ג'ול.

5) א. תקטן פי 2. ב. תקטן פי 4 . ג. תקטן פי 8. ד. תגדל פי 2. ה. תקטן פי 2.

6) א. 800 ג'ול. ב. 50 ג'ול. ג. 750 ג'ול. **7)** א. 500000 ג'ול. ב. 166.6 מטר.

8) 40 m/sec. **9)** א. 45 מטר. ב. לא.

10) א. $V_A = 12.649$ m/sec, $V_B = 6.324$ m/sec ב. לא.

11) א. 2 m/sec. ב. 1.73 m/sec.

12) נקודה A: 64,28,36,6. נקודה B: 64, 0, 64, 8. נקודה C: 64,15,49,7.

נקודה D: 0 , 0 , 64 , 64 .

פרק י"ח - תנע ואנרגיה

בפרקים הקודמים קבענו את החוקיות בתיאור תנועת הגופים. הכרנו את החוק השני של ניוטון אשר מהווה תיאור מצבו של הגוף **בכל רגע ורגע**:

$$F_{tot} = m \cdot a \qquad (1)$$

F_{tot} הוא הכוח השקול, הפועל על הגוף, m – מסת הגוף ו- a – תאוצתו.

לאחר מכן פיתחנו שני תיאורים **מסכמים** של תנועת הגופים. למדנו, שהתיאורים המסכמים דורשים מושגים חדשים: אנרגיה ותנע.

התיאור המסכם הראשון היה תיאור השפעתו של כוח, הפועל על גוף לאורך **מרחק** פעולתו. לצורך זה הוגדר המושג **עבודה**. עבודה של כוח קבוע F, הפועל לאורך המרחק Δx היא:

$$W = F \cdot \Delta x \qquad (2)$$

כתוצאה מביצוע של עבודה, משתנה מצב תנועת הגוף המאופיין על ידי האנרגיה הקינטית (אשר מוגדרת: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$) כך, שהקשר בין העבודה והשינוי שחל באנרגיה הקינטית הוא:

$$W = \Delta E_{kin} \qquad (3)$$

התיאור השני היה תיאור, המסכם את השפעתו של הכוח, הפועל על הגוף לאורך **הזמן** של פעילות הכוח. לצורך זה הוגדר המושג **מתקף**. מתקף של כוח קבוע F, הפועל בפרק זמן Δt הוא:

$$J = F \cdot \Delta t \qquad (4)$$

כתוצאה מפעילות המתקף משתנה מצב תנועתו של הגוף, המאופיין על ידי תנע, או כמות התנועה (אשר מוגדרת: $p = m \cdot v$) כך, שהקשר בין העבודה לבין השינוי, שחל באנרגיה קינטית הוא:

$$J = \Delta p \qquad (5)$$

הייחודיות של שני התיאורים המסכמים היא בכך, שהם אינם מתייחסים, למה שקורה עם הגוף בכל רגע ורגע, אלא משווים את מצב תנועת הגוף בין שני מצבים לאורך מרחק (אנרגיה), או לאורך פרק זמן – תנע. נסכם שני תיאורים אלה בטבלה:

טבלת השוואה בין המושגים אנרגיה ותנע

תיאור מסכם של פעולת הכוח	לאורך **מרחק** ΔX	**בזמן** Δt
אפיון התנועה	**אנרגיה קינטית** $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$	**תנע** $p = m \cdot v$
אפיון השפעת הכוח	**עבודה** $W = F \cdot \Delta X$	**מתקף** $J = F \cdot \Delta t$
הטענה הכמותית על השפעת הכוח על תנועת הגוף	$W = \Delta E_{kin}$	$J = \Delta p$

אנו רואים שקיימת הקבלה חשובה בין התיאורים המסכמים של תנועת הגופים. שני התיאורים, זה שעל ידי האנרגיה הקינטית וזה שעל ידי התנע, הם תיאורים, המשלימים זה את זה.

יחס השלמה זה תואם את יחס ההשלמה, הקיים בין תיאורי המציאות **בזמן** ו**במרחב**.



בין התכונות החשובות ביותר של אנרגיה ותנע נציין גם את **חוקי השימור** של גדלים אלה. חוקים אלה תואמים את האופי הכולל של התיאור: הם משווים את האנרגיה או את התנע בשני זמנים או בשני מקומות, וטוענים שקיים שימור של גודל האנרגיה או של התנע, ללא קשר למה שהתרחש בין ההשוואות. ניסחנו את חוקי שימור באופן הבא:

הטענה לגבי שימור גודל בתהליכים פיזיקאליים	ללא עבודה של כוח חיצוני ושל כוחות לא משמרים **נשמרת האנרגיה** המכאנית של הגוף, או של מערכת הגופים	ללא מתקף של כוח חיצוני **נשמר התנע** של הגוף או של מערכת הגופים

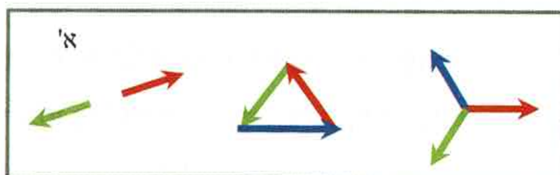
ניתן לראות, שהניסוח של חוק שימור האנרגיה שונה מזה של חוק שימור התנע. הבדל זה מצביע על הצורך להבחין בייחודיות של האנרגיה ושל התנע.

ההבדלים בין אנרגיה קינטית לתנע

אמנם גם התנע וגם האנרגיה הקינטית עוסקים בתנועתם של גופים, אך קיימים ביניהם מספר הבדלים חשובים:

התנע הוא גודל בעל כיוון (גודל וקטורי), ולכן כללי החיבור של התנע הם מיוחדים. ניתן להדגים אותם בעזרת חיצים, גם הם בעלי כיוון. למשל, כל אחת משלושת הקבוצות בתרשים א' מסתכמת באפס, למרות שכל אחד מן החיצים, המסתכמים, אינו שווה לאפס. כך מסתכמים מהירויות, כוחות, תנעים ומתקפים. לעומת זאת, האנרגיה הקינטית היא גודל חיובי וללא כיוון, וסכום של אנרגיות קינטיות גדול יותר מהמחוברים (ששניהם אינם אפס).





לדוגמה, שני רכבים זהים, בעלי מהירויות שוות, הנעים זה לקראת זה ומתנגשים. התנע הכולל של שניהם הוא אפס, וכך יישאר גם לאחר ההתנגשות. אולם, האנרגיות הקינטיות של שתי המכוניות אינה אפס לפני ההתנגשות, ומתאפסת לאחר ההתנגשות. אנו עדים לכך, שהתנע הכולל של הגופים נשמר לפני ואחרי ההתנגשות, והאנרגיה הקינטית

אינה נשמרת. ניתן לשאול: לאן נעלמה האנרגיה של התנועה, שהייתה למכוניות? את התשובה לכך נקבל, כאשר נבחן את תוצאות האירוע.

המציאות היא, שמלבד העצירה לשתי המכוניות נגרם נזק רציני, הכולל שינוי צורה (עיוות ושבירה) של גופי המכוניות והתחממותם. כל זה כלל גם את תנועת החלקיקים, המרכיבים את המכוניות, אך התנועה שלהם הייתה אקראית, כלומר בכיוונים שונים, כך שהתנע הכללי של החלקיקים התאפס, אך לא כך האנרגיה. אנו מגיעים למסקנה, שעקב ההתנגשות של המכוניות, אשר נעצרו, כל האנרגיה הקינטית שלהן הועברה לאנרגיה פנימית של גופי המכוניות. זהו ההבדל בין התנע לאנרגיה הקינטית.

בהסתכלות חיצונית, **האנרגיה הקינטית** נעלמה, אך למעשה היא הועברה לאנרגיה הפנימית של הגופים המתנגשים (קינטית ופוטנציאלית).
באותו זמן, עקב האקראיות בכיווני התנועה של החלקיקים שבתוך הגופים, **התנע** של הגופים ,המתנגשים, לא השתנה.



נוכל לסכם שההבדל בין תנע ואנרגיה קינטית מתבטא בכך, שהתנע הוא וקטור, שגודלו פרופורציוני למהירות, בזמן שאנרגיה קינטית היא גודל ללא כיוון, ופרופורציונית לריבוע של המהירות (כלומר הגדלת המהירות פי שניים, מגדילה את התנע פי שניים, ואת האנרגיה – פי ארבע).

נדגים את יחס ההשלמה בתיאור תופעות בעזרת אנרגיה קינטית ותנע על ידי תיאור התופעות החשובות, המתרחשות בהתנגשות ובפיצוץ.

כבר הגדרנו שני סוגי התנגשות קיצוניים באופי: **פלסטית ואלסטית**. כאמור, בשניהם נשמר התנע של הגופים, המתנגשים, אולם האנרגיה קינטית יכולה שלא להישמר. זה קורה לדוגמה, כאשר שני גופים מתנגשים באופן **פלסטי**. נדמיין גוף, שמסתו m_1, הנע במהירות v_1, ומתנגש בגוף אחר, שמסתו m_2 (תרשים ב). לאחר ההתנגשות הגופים נצמדים ונעים במהירות משותפת u (תרשים ג').



המתקפים, שהגופים מפעילים זה על זה במהלך ההתנגשות, הם שווים ומנוגדים. מכאן, שהתנע יישמר ונקבל:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2) \cdot u \qquad (6)$$

עתה נבדוק את האנרגיה הקינטית. לפני ההתנגשות היא הייתה:

$$E_1^{kin} = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 \qquad (7)$$

במקרה שהגוף השני היה נייח לפני התנגשות: $E_1^{kin} = \frac{1}{2}mv_1^2$

לאחר ההתנגשות האנרגיה הקינטית של המערכת היא:

$$E_2^{kin} = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \cdot u^2 \qquad (8)$$

היחס בין האנרגיה הקינטית הסופית לזו שלפני ההתנגשות יהיה:

$$\frac{E_2^{kin}}{E_1^{kin}} = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2} \cdot \frac{u^2}{v_1^2} \qquad (9)$$

נחלץ את u ממשוואה של חוק שימור התנע (6) ונקבל:

$$u = \frac{m_1}{m_1 + m_2}v_1 \qquad (10)$$

נשים לב, שהואיל ו-$\frac{m_1}{m_1 + m_2} < 1$, המהירות המשותפת של הגופים קטנה מהמהירות v_1:

$$u < v_1 \qquad (11)$$

אם נציב ביטוי (10) במשוואה (9) נקבל:

$$\frac{E_2^{kin}}{E_1^{kin}} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} < 1 \qquad (12)$$

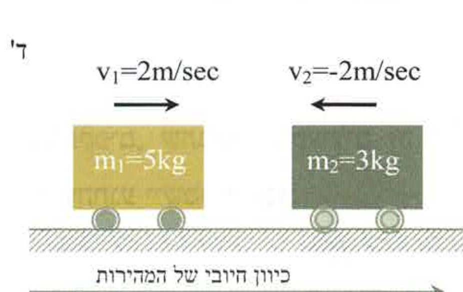
תוצאה זו מעידה על כך, שהאנרגיה הקינטית הכוללת של הגופים פוחתת בהתנגשות. במקרה בו הגופים זהים במסה ($m_1=m_2$), האנרגיה הקינטית קטנה פי שתיים. כבר הסברנו, שאנרגיה זו מועברת ל**אנרגיה פנימית** של הגופים (חום, שינוי צורה). הניסיון מעיד, שאם ניקח בחשבון אנרגיה זו, גם האנרגיה הכללית תישמר בתהליך ההתנגשות.

דוגמה

שני גופים (תרשים ד') נעים זה לקראת זה ומתנגשים פלסטית. המהירויות והמסות ידועות. יש למצוא:

(א) את המהירות המשותפת של הגופים לאחר ההתנגשות.

(ב) את הגידול באנרגיה הפנימית של הגופים עקב ההתנגשות.



פתרון:

א. תחילה נקבע את הכיוון ימינה ככיוון החיובי של המהירויות. נמצא את המהירות המשותפת בעזרת חוק שימור התנע, משוואה (6):

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) \cdot u$$

$$5kg \cdot 2\frac{m}{sec} + 3kg \cdot (-2)\frac{m}{sec} = (5+3)kg \cdot u$$

$$u = 0.5\frac{m}{sec}$$

מאחר והתקבל u חיובי, המערכת נעה ימינה לאחר ההתנגשות.

ב. האנרגיה הקינטית לפני ההתנגשות ניתנת על ידי משוואה (7):

$$E_1^{kin} = \frac{m_1 {v_1}^2}{2} + \frac{m_2 {v_2}^2}{2} = \frac{5kg \cdot \left(2\frac{m}{sec}\right)^2}{2} + \frac{3kg \cdot \left(2\frac{m}{sec}\right)^2}{2} = 16J$$

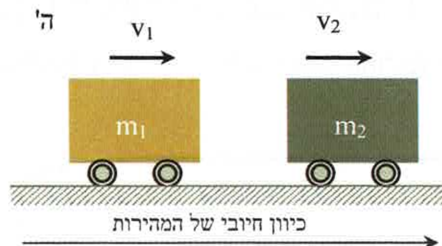
על סמך תוצאת החישוב של המהירות המשותפת לאחר ההתנגשות נחשב את האנרגיה הקינטית של הגופים לאחר ההתנגשות:

$$E_2^{kin} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot u^2}{2} = \frac{(5+3)kg \cdot \left(0.5\,\frac{m}{sec}\right)^2}{2} = 1J$$

מכאן נסיק שאנרגיה בסך 15J הפכה לאנרגיה פנימית של הגופים לאחר ההתנגשות.

אנרגיה ומתקף בהתנגשות אלסטית

כפי שציינו, בהתנגשות אלסטית חוזרים הגופים המתנגשים לצורתם המקורית בדומה לקפיץ פלדה. נרחיב עתה ונציין, שכמו בקפיץ, בו יכול להתרחש מעבר בין אנרגיה קינטית לאנרגיה פוטנציאלית אלסטית באופן מחזורי, גם בהתנגשות אלסטית מתרחש תהליך דומה, והגופים חוזרים לצורתם ההתחלתית לאחר ההתנגשות. במצב זה אנו יכולים לטעון לשימור האנרגיה הקינטית של מערכת הגופים לפני ולאחר ההתנגשות. ברור אם כן, שהאנרגיה הפנימית של המערכת אינה משתנה גם היא. נתבונן בהתנגשות אלסטית בין שני גופים שמהירויותיהם לפני ההתנגשות v_1 ו- v_2, ולאחר ההתנגשות u_1 ו- u_2 (תרשים ה').



משימור תנע קווי נקבל:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2 \qquad (13)$$

בנוסף, משימור אנרגיה קינטית נקבל:

$$\frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} = \frac{m_1u_1^2}{2} + \frac{m_2u_2^2}{2} \qquad (14)$$

אם המסות והמהירויות שלפני ההתנגשות ידועות, משוואות (13) ו- (14) יוצרות מערכת של שתי משוואות עם שני נעלמים, שניתן לפתור אותה ולמצוא את המהירויות הסופיות u_1 ו- u_2.

אם נסדר את משוואה (13) נקבל:

$$m_1(v_1 - u_1) = m_2(u_2 - v_2) \qquad (15)$$

באופן דומה נסדר את משוואה (14):

$$m_1(v_1^2 - u_1^2) = m_2(u_2^2 - v_2^2) \qquad (16)$$

אם נחלק את משוואה (16) במשוואה (15) ונשתמש בזהות: $a^2 - b^2 = (a-b)(a+b)$, נקבל:

$$v_1 + u_1 = u_2 + v_2 \qquad (17)$$

או בצורה שקולה:

$$v_1 - v_2 = -(u_1 - u_2) \qquad (18)$$

את המשמעות של התוצאה (18) נבין, אם נזהה, שהביטוי $(v_1\text{-}v_2)$ מבטא את המהירות של גוף 1 יחסית לגוף 2 לפני ההתנגשות. באופן דומה, הביטוי $(u_1\text{-}u_2)$ מבטא את המהירות של גוף 1 יחסית לגוף 2 לאחר ההתנגשות. מכאן נוכל לטעון ש:



בהתנגשות אלסטית בין גופים גודל **המהירות היחסית** בין הגופים לאחר ההתנגשות שווה לגודלה של המהירות היחסית לפני ההתנגשות.



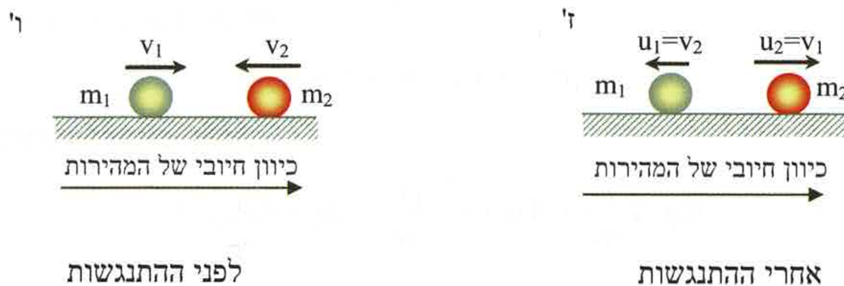
ניתן להבין תוצאה זו, אם נדמיין שני אנשים היושבים על כל אחד מן הגופים המתנגשים. אם ההתנגשות היא אלסטית, אזי כל אחד מן האנשים יראה את השני מתקרב אליו, ואחרי ההתנגשות מתרחק ממנו בדיוק באותו גודל המהירות.

עבור התנגשות אלסטית ניתן, אם כן, להשתמש בזוג משוואות (13) ו- (17), בהם כל המידע על ההתנגשות וכך, למשל, למצוא את המהירויות לאחר ההתנגשות:

$$\begin{cases} m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \\ v_1 + u_1 = u_2 + v_2 \end{cases} \qquad (19)$$

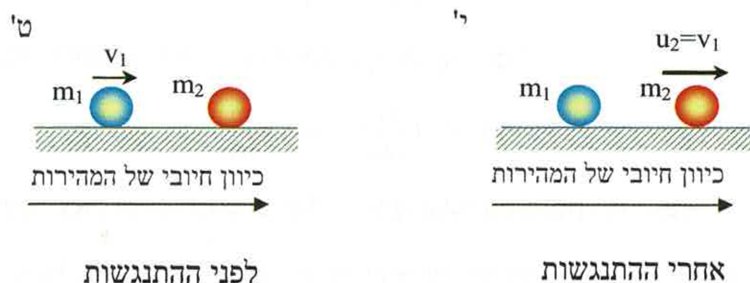
נציין במיוחד שני מצבים פרטיים, להם כדאי להיות מודעים מראש.

1. התנגשות אלסטית של שני **גופים זהים**: $m_1=m_2$ (תרשים ו').



במצב זה מערכת (19) מספקת פתרון קל: $u_1=v_2$ ו- $u_2=v_1$ (תרשים ז'). כלומר, הגופים החליפו ביניהם את המהירויות.

2. התנגשות אלסטית של שני **גופים זהים** ($m_1=m_2$), כאשר אחד מהם **נייח** ($v_2=0$) (תרשים ט'). במקרה זה מערכת המשוואות (19) מספקת פתרון ייחודי: הגוף הפוגע ייעצר, והגוף הנפגע יקבל את מלוא המהירות של הגוף הראשון: $u_2=v_1$ (תרשים י'). מצב זה צופים במשחק סנוקר.



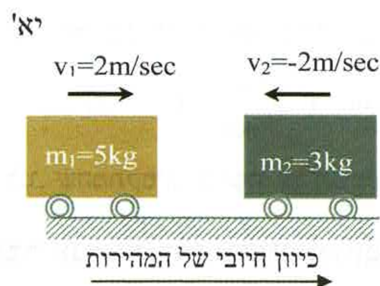
דוגמה

שני הגופים, המתוארים בתרשים, נעים זה לקראת זה ומתנגשים אלסטית.

א. מהן המהירויות של הגופים לאחר ההתנגשות?

ב. מהו המתקף שפעל על גוף 1?

ג. מהו המתקף שפעל על גוף 2?



פתרון

א. מחוק שימור התנע מקבלים:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2$$

נציב את הנתונים ונקבל:

$$5kg \cdot 2\frac{m}{sec} + 3kg \cdot (-2)\frac{m}{sec} = 5kg \cdot u_1 + 3kg \cdot u_2$$

או:

$$4 = 5u_1 + 3u_2$$

הואיל וההתנגשות היא אלסטית, מתקיים היחס בין המהירויות (17),

$$v_1 + u_1 = v_2 + u_2$$

אשר לאחר התוצאה, שקיבלנו מאפשר לטעון:

$$2 + u_1 = -2 + u_2$$

או:

$$4 = u_2 - u_1$$

מהתרת שתי המשוואות עבור המהירויות u_1 ו- u_2 נקבל:

$$u_1 = -1\frac{m}{sec}\ ,\ u_2 = 3\frac{m}{sec}$$

קיבלנו, שכתוצאה מן ההתנגשות, שני הגופים הפכו את מגמת תנועתם.

ב. המתקף, שפעל על גוף m_1, שווה, לפי החוק השני של ניוטון (5), לשינוי בתנע שלו:

$$J_1 = \Delta p_1 = m_1u_1 - m_1v_1 = 5kg \cdot (-1)\frac{m}{sec} - 5kg \cdot 2\frac{m}{sec} = -15N \cdot sec$$

ג. המתקף, שפעל על m_2, שווה, לפי החוק השני של ניוטון (5), לשינוי בתנע שלו:

$$J_2 = \Delta p_2 = m_2u_2 - m_2v_2 = 3kg \cdot 3\frac{m}{sec} - 3kg \cdot (-2)\frac{m}{sec} = 15\ N \cdot sec$$

קיבלנו, שהמתקפים שפעלו על הגופים בהתנגשות שווים בגודל והפוכים בכיוון.

מעבר אנרגיה בהתנגשות אלסטית

ראינו שבהתנגשות אלסטית המהירות, ולכן האנרגיה הקינטית של הגופים, משתנה. עתה נבהיר, איך מתחלקת האנרגיה הקינטית בהתנגשות זו, כלומר: איזה גוף מוסר אנרגיה

ואיזה גוף מקבל אותה בחלוקה מחדש בזמן ההתנגשות. לצורך זה ניקח את הנתונים של הדוגמה האחרונה, ונמלא טבלה עבור הערכים של התנע ושל האנרגיה הקינטית.

	תנע לפני kg·m/sec	תנע אחרי kg·m/sec	השינוי בתנע kg·m/sec	אנרגיה לפני J	אנרגיה אחרי J	השינוי באנרגיה J
גוף m_1	10	-5	-15	10	2.5	-7.5
גוף m_2	-6	9	15	6	13.5	7.5

מן המקרה הפרטי אנו יכולים ללמוד על המתרחש. שינוי של תנע וגם של אנרגיה קינטית של אחד מן הגופים המתנגשים הוא השינוי ההפוך של הגודל המתאים של הגוף השני:

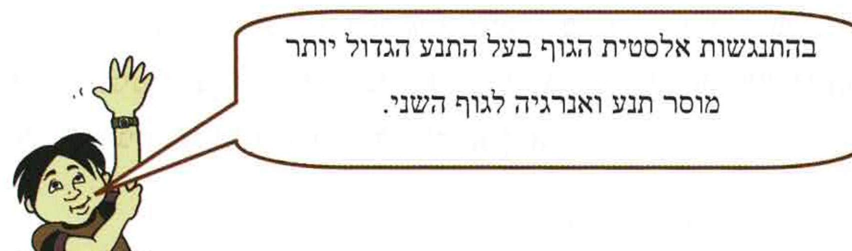
$$\Delta E_1^{kin} = -\Delta E_2^{kin} \qquad \Delta p_1 = -\Delta p_2 \qquad (19)$$

במקרה שלנו הגוף הראשון הוא זה שהפסיד תנע ואנרגיה לטובת הגוף השני (הרי הן התנע והן האנרגיה הקינטית נשמרים בהתנגשות אלסטית).

הסיבה לכך, שהשינוי באנרגיה ובתנע הם במגמה זהה, היא בכך, שגדלים אלה קשורים בגודלם. ואמנם, אם נבטא את מהירות הגוף דרך התנע $v=\frac{p}{m}$ ונציב בביטוי עבור האנרגיה הקינטית $E_k=\frac{mv^2}{2}$ נקבל ש:

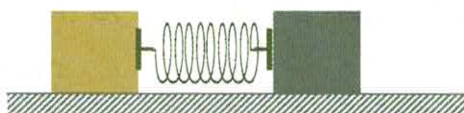
$$E_k=\frac{p^2}{2m} \qquad (20)$$

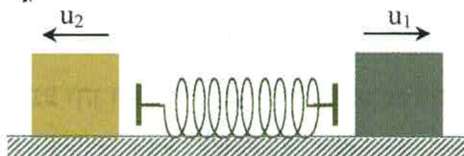
כלומר, הואיל והן התנע והן האנרגיה הקינטית מאפיינים את התנועה של הגוף, ערכיהם קשורים. הקשר בין ערכי אנרגיה קינטית ותנע הוא קשר ריבועי ישיר, ומכאן, הקטנת התנע מלווה גם בהקטנת האנרגיה הקינטית. במילים אחרות: הגוף, המוסר תנע, מוסר גם את האנרגיה קינטית.





תהליך פיזיקאלי אחר, השונה מהתנגשות, אך גם הוא חשוב ונפוץ בטבע, הוא **התפוצצות**. במקרה זה מדובר במערכת, שתחילה אינה בתנועה, אך נאגרה בה אנרגיה פוטנציאלית (מכל סוג שהוא) בכמות ניכרת. במהלך תהליך מסוים, הנמשך זמן קצר מאוד, עוברת אנרגיה זו לאנרגיה קינטית. זוהי התפוצצות.





נדמיין מערכת של שני גופים שקפיץ לחוץ ביניהם. מערכת זו מהווה **מודל (חיקוי מייצג)** טוב לתהליך ההתפוצצות. נחשוב, שהקפיץ המצוי בין הגופים מכווץ, ומשהו מונע את שחרורו. המערכת כולה נמצאת במנוחה (תרשים יב'). אך ברגע שמשחררים את הקפיץ, הוא מתארך ודוחף, ולכן מאיץ את הגופים. הגופים מתחילים לנוע, וממשיכים לעשות כך גם לאחר ניתוק המגע מהקפיץ (תרשים יג'). על סמך שימור התנע של המערכת נוכל למצוא את המהירויות, שרוכשים הבולים.

השימוש בחוק הוא מוצדק, כי לא פועלים כוחות חיצוניים על המערכת.

נרשום שוויון של התנע לפני ואחרי "הפיצוץ":

$$0 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \qquad (21)$$

ומכאן:

$$-\frac{m_2}{m_1} = \frac{u_1}{u_2} \qquad (22)$$

נשים לב למגמות המנוגדות של המהירויות – הדבר אופייני להתפוצצות. גודלן של המהירויות עומד ביחס הפוך למסות של חלקי הגופים, המתפזרים לאחר הפיצוץ.

לעומת התנע, האנרגיה הקינטית אינה נשמרת בפיצוץ. מקורה של אנרגיה זו הוא באנרגיה הפנימית של המערכת, העוברת פיצוץ. במודל שלנו זו האנרגיה האלסטית של הקפיץ. אנרגיה זו עוברת לאנרגיה קינטית שגודלה:

$$E_2^{kin} = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \qquad (23)$$

היחס בין האנרגיות הקינטיות של הגופים לאחר הפיצוץ הוא:

$$\frac{E_1^{kin}}{E_2^{kin}} = \frac{\frac{1}{2}m_1 u_1^2}{\frac{1}{2}m_2 u_2^2} = \frac{m_1}{m_2}\left(\frac{u_1}{u_2}\right)^2 \qquad (24)$$

נשתמש ביחס (22) שבין המהירויות ונקבל:

$$\frac{E_1^{kin}}{E_2^{kin}} = \frac{m_1}{m_2}\left(-\frac{m_2}{m_1}\right)^2 = \frac{m_2}{m_1} \qquad (25)$$

כלומר:



בתהליך של התפוצצות, האנרגיה הקינטית מתחלקת בין החלקים, המתרחקים, ביחס הפוך למסות החלקים.

פרוש הדבר הוא, שהגוף, בעל המסה הקטנה יותר, מקבל חלק גדול יותר מהאנרגיה האלסטית הפנימית של הגוף (או מערכת של גופים) המתפוצץ.

לדוגמה, בעת הירי הגדלת המסה של התותח, או הצמדתו לקרקע (או, במקרה של יורה, הגדלת המסה של הרובה ביחד עם הגוף של היורה) מגדילה את האנרגיה הקינטית של הפגז (או של הקליע) לעומת האנרגיה העוברת לגוף היורה. כך, אם מסת הקליע ומסת היורה היו שוות, הרתע היה ממש קטלני.



[הדוגמה הנפוצה והמייצגת לפיצוץ היא זיקוקי די-נור. זאת משום שניתן לראות, שחלקיקי הפגז, המתפוצץ באוויר, מתפזרים לכל הכיוונים. לא ייתכן פיצוץ, בו כל הרסיסים יעופו לכיוון אחד, כי במקרה כזה זה לא היה תואם לחוק שימור התנע (בדרך כלל הפיצוץ של הזיקוקים מתרחש בשיא גובהו של הפגז, כאשר מהירותו היא בסביבת האפס).

במקרה של התפוצצות פגז, המקור לאנרגיה הקינטית ולתנע של החלקים הרבים היא התגובה הכימית המהירה מאוד, בה מתרחשת המרה של אנרגיה חשמלית פנימית לאנרגית תנועה.



שאלות הבנה וחשיבה - לדיון בכיתה

1. כששני גופים מתנגשים אלסטית הגוף המוסר אנרגיה הוא הגוף:

א. המהיר יותר.

ב. בעל האנרגיה הקינטית הגדולה יותר.

ג. בעל התנע הגדול יותר.

ד. אף תשובה מהנ"ל אינה נכונה.

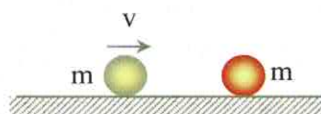
2. בהתנגשות פלסטית בין 2 מסות זהות, כשאחת מהן הייתה בתחילה במנוחה, האנרגיה הקינטית של המערכת לאחר ההתנגשות:

א. קטנה פי 2.

ב. קטנה פי 4.

ג. גדלה פי 2.

ד. אינה משתנה.



3. לגוף קל ולגוף כבד יש אותה כמות של אנרגיה קינטית. האם נכון ש:

א. התנע של הגוף הכבד גדול יותר?

ב. התנע של הגוף הקל גדול יותר?

ג. התנע של שני הגופים שווה?

ד. לא ניתן לדעת למי מהגופים תנע גדול יותר?

4. האנרגיה הקינטית נשמרת:

א. בהתפוצצות.

ב. בהתנגשות אלסטית.

ג. בהתנגשות פלסטית.

ד. בכל סוגי ההתנגשויות.

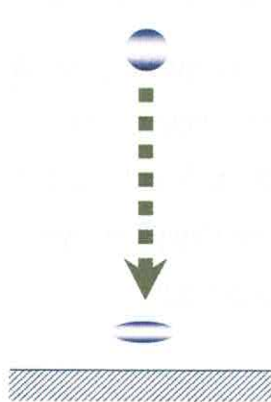
5. התנע נשמר:

א. רק בהתנגשות אלסטית.

ב. רק בהתנגשות פלסטית.

ג. רק בהתפוצצות.

ד. בכל סוגי ההתנגשויות.



6. כדור פלסטלינה הופל מגובה מסוים מעל לקרקע, ונדבק לרצפה. האם נכון ש:

א. התנע של כדור הפלסטלינה נשמר?

ב. האנרגיה הקינטית של כדור הפלסטלינה נשמרת?

ג. האנרגיה הקינטית של כדור הפלסטלינה הופכת לחום ושינוי צורה?

ד. התנע הכולל של הכדור והרצפה אינו נשמר?

7. משחררים כדור מגובה מסוים מעל הארץ, והוא חוזר לאחר ההתנגשות עם הרצפה לאותו גובה, ממנו שוחרר. האם נכון ש:

א. ההתנגשות עם הרצפה הייתה אלסטית?

ב. השינוי בתנע של הכדור שווה לאפס?

ג. מהירות הכדור ברגע פגיעתו בארץ שווה למהירותו ברגע ניתוקו מהרצפה?

ד. כל התשובות נכונות?

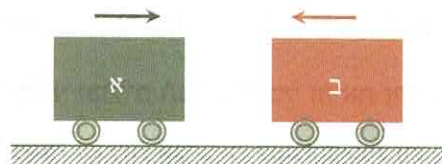
8. שני גופים זהים נעים זה לעומת זה באותו גודל של מהירות. האם נכון ש:

א. התנע הכללי של מערכת הגופים שווה לאפס?

ב. האנרגיה הקינטית הכוללת אינה שווה לאפס?

ג. אם ההתנגשות ביניהם תהיה פלסטית הם ייעצרו לאחר ההתנגשות?

ד. כל התשובות נכונות?





תנע ואנרגיה

1. ציינו שני הבדלים בין תנע לאנרגיה קינטית.

2. מה קורה לאנרגיה הקינטית, האובדת בהתנגשות פלסטית?

3. האם בהתנגשות אלסטית בין גופים, בהתנגשות פלסטית ובהתפוצצות:

א. התנע תמיד נשמר? נמקו. ב. האנרגיה הקינטית נשמרת? נמקו.

4. כדור, שמסתו m, נזרק לעבר קיר במהירות v, ומתנגש בו אלסטית. מהו השינוי בתנע של הכדור בעקבות ההתנגשות?

5. הוכח, שאם לשני גופים יש אותה כמות של אנרגיה קינטית, אזי התנע של הגוף הכבד יותר הוא גדול יותר.

6. בזמן ירי מצמידים את קת הרובה לכתף. הסבירו מדוע.

7. קליע נורה לעבר בול עץ, ויוצא מצדו השני. האם ההתנגשות הייתה: אלסטית, פלסטית או סוג אחר של התנגשות? נמקו.

8. שני גופים בעלי אותה מסה נעים במהירויות שונות זה לקראת זה. אם ההתנגשות ביניהם היא אלסטית:

א. מה קורה למהירויות של הגופים? נמקו.

ב. האם האנרגיה הקינטית של כל אחד לאחר ההתנגשות שווה לאנרגיה הקינטית שלו לאחר ההתנגשות? נמקו.

9. מגדילים את מהירותו של כדורסל, הנזרק לעבר הסל, פי 2.

א. פי כמה גדלה עוצמת החבטה, שהכדור יכול להפעיל על לוח הכדורסל?

ב. פי כמה תגדל מידת הנזק שהכדור יכול לגרום?

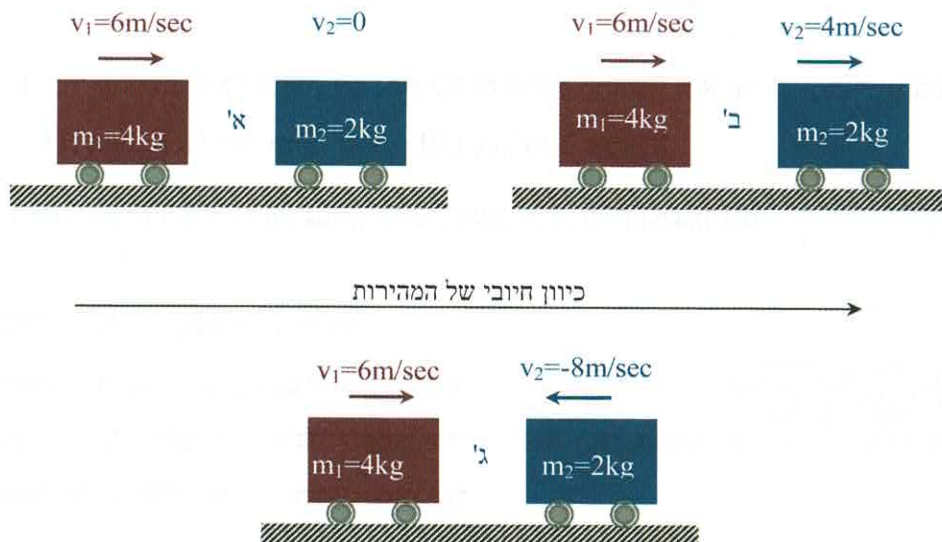
10. א. באיזה תנאי יכולים תנעים לבטל זה את זה?

ב. באיזה תנאי יכולות אנרגיות לבטל זו את זו?



שאלות חישוב

1. בתרשימים שלפניכם הוצגו שלושה מקרים של התנגשויות חזיתית בין שני קרונות שמסתן 2 ק"ג ו- 4 ק"ג.



ענו לגבי כל אחד משלושה המקרים על השאלות הבאות:

א. מהו התנע הקווי הכללי של המערכת לפני ההתנגשות (גודל וכיוון)?

ב. מהו התנע הקווי הכללי של המערכת אחרי ההתנגשות (גודל וכיוון)?

ג. בהנחה שההתנגשות היא התנגשות פלסטית:

(I) מהי המהירות הסופית (גודל וכיוון) של כל אחד מהקרנות?

(II) מהו המתקף (גודל וכיוון), שפעל על כל אחד מהקרנות?

(III) כמה אנרגיה קינטית אבדה בהתנגשות?

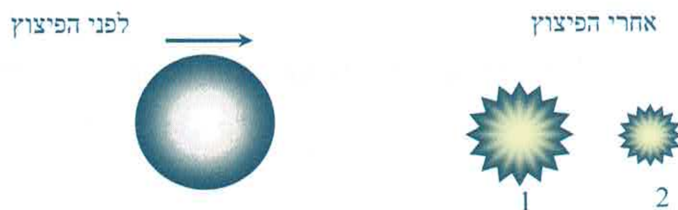
ד. בהנחה שההתנגשות היא התנגשות אלסטית:

(I) מהי המהירות הסופית (גודל וכיוון) של כל אחד מהקרנות?

(II) מהו המתקף (גודל וכיוון), שפעל על כל אחד מהקרנות?

(III) כמה אנרגיה קינטית אבדה בהתנגשות?

2. כדור, שמסתו 5kg, נע במהירות 8 m/sec ימינה על משטח חלק, ומתפוצץ לשני חלקים.



א. מהי מהירות החלק השני, אם נתון שמסת החלק הראשון היא 4 kg, ומהירותו היא:
(I) אפס. (II) 2 m/sec ימינה (III) 2 m/sec שמאלה.

ב. מהי כמות האנרגיה הקינטית, שנוצרה בכל אחת מההתפוצצויות?

3. קליע, שמסתו 10gr, נע במהירות 150 m/sec, נתקע בבול עץ, שמסתו 4 kg, הקשור לקפיץ, שקבוע הקפיץ שלו 100 N/m. מהו הכיווץ המקסימאלי של הקפיץ, אם ידוע שהמשטח חלק?

v_1

4. קליע, שמסתו 80gr, נורה אופקית במהירות 300 m/sec לעבר בול עץ, הנמצא במנוחה, שמסתו 5 kg. לפניכם שני מצבים אפשריים:

(I) הקליע נתקע בבול העץ.

(II) הקליע יוצא מצידו השני במהירות 200 m/sec.

לגבי כל אחד מהמצבים I ו-II ענה/י על השאלות הבאות:

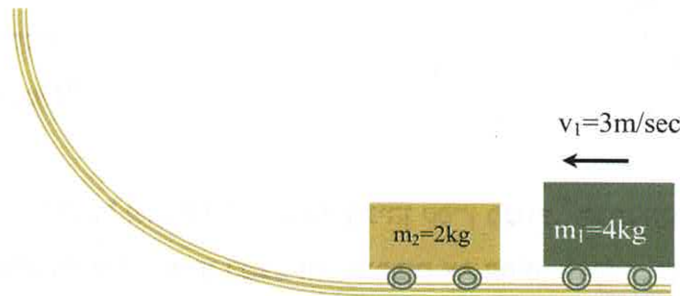
א. מהי מהירות בול העץ לאחר פגיעת הקליע?

ב. כמה אנרגיה אבדה בהתנגשות בין הקליע לבין בול העץ?

5. מסה של 4 kg נעה על משטח חלק במהירות של 3 m/sec, ופוגעת במסה שנייה עומדת של 2 kg. מהו הגובה, אליו תעלה המסה של 2 kg, בהנחה ש:

א. ההתנגשות בין המסות היא פלסטית.

ב. ההתנגשות בין המסות היא אלסטית.



6. כדור, שמסתו m, קשור לחוט, שאורכו 0.8m, מוסט לזווית 90°, ושוחרר. בתחתית מסלולו הכדור מתנגש בכדור שני, נייח, שמסתו זהה. שני מצבים הם אפשריים:

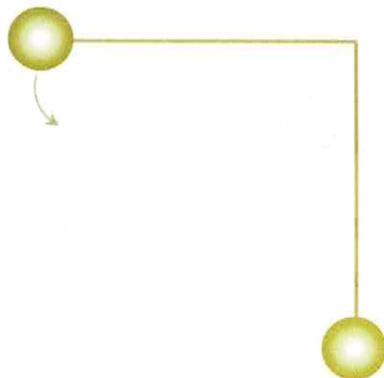
(I) התנגשות אלסטית.

(II) התנגשות פלסטית.

לגבי כל אחד מהמצבים ענו על השאלות הבאות:

א. מהי מהירותו של כל אחד מהכדורים אחרי ההתנגשות?

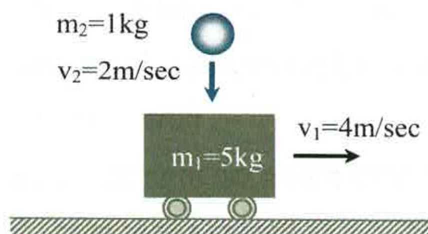
ב. מהו הגובה, אליו מגיעים הכדורים?



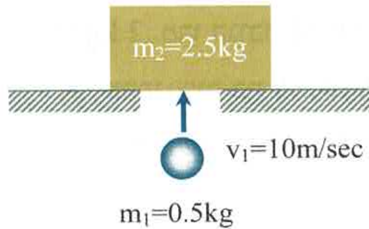
7. קרון, בעל מסה 5 kg, נע על משטח חלק במהירות 4 m/sec. על גוף נופלת מסה של 1kg במהירות של 2m/sec, ונדבקת אליו.

א. מהי המהירות המשותפת של הגוף והקרון?

ב. כמה אנרגיה קינטית אבדה בהתנגשות?



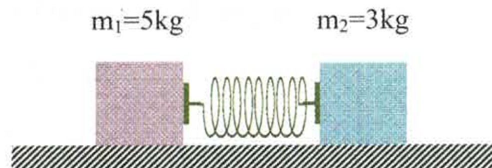
8. כדור, שמסתו 0.5kg, פוגע מלמטה במהירות 10m/sec בתיבה שמסתה 2.5 kg, הנמצאת במנוחה. בעקבות ההתנגשות מתרוממת התיבה. מהו שיא הגובה של התיבה, בהנחה שההתנגשות היא:



א. פלסטית?

ב. אלסטית?

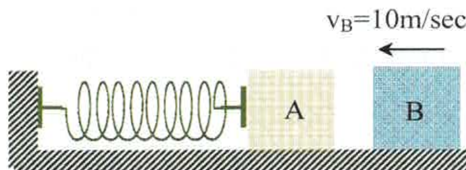
9. שתי מסות מונחות על משטח חלק, כאשר ביניהן קפיץ מכווץ. קבוע הקפיץ 50 N/m, וחוט דק מחזיק אותן במצב זה. חותכים את החוט, והקפיץ, שאינו קשור לאף אחת מהמסות, משתחרר. המסה של 3kg מקבלת כתוצאה מהשחרור מהירות של 8 m/sec ימינה.



א. מהי מהירות המסה של 5kg לאחר השחרור?

ב. באיזה מידה היה הקפיץ מכווץ?

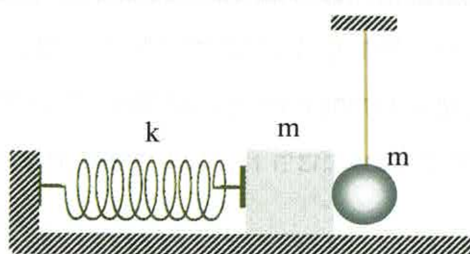
10. גוף A, שמסתו 5kg, נמצא במנוחה על משטח אופקי חלק, כשהוא מחובר לקפיץ רפוי, שקבוע הכוח שלו הוא 50,000N/m. גוף B, שמסתו 5kg, נע שמאלה במהירות 10m/sec לעבר הגוף A, ומתנגש בו בהתנגשות אלסטית לחלוטין.



א. מהן מהירויות שני הגופים לאחר ההתנגשות?

ב. בכמה יתכווץ הקפיץ?

11. בול, שמסתו $m=0.5kg$, מחובר לקצהו של קפיץ רפוי, בעל קבוע הכוח של $k=50N/m$. הבול חופשי להחליק על גבי משטח אופקי חלק. כדור שמסתו אף היא m, תלוי באמצעות חוט שאורכו $L=0.4m$. מכווצים את הקפיץ בשיעור של 0.4m, כשהמסה צמודה לקצהו, ומשחררים.



א. מה תהיה מהירות כל אחד מהגופים מיד לאחר ההתנגשות, אם היא הייתה אלסטית?

ב. מהו המתקף, שהפעיל הגוף על הכדור?

תשובות

1. עבור ציור א': א) 24 kg·m/s ב) 24 kg·m/s ג) 1) 4m/s 2) 8 N·s , -8 N·s 3) 24j ד) 1) 2 m/s, 8 m/s 2) 16 N·s , -16 N·s 3) 0

עבור ציור ב': א) 32 kg·m/s ב) 32 kg·m/s ג) 1) 5.33m/s 2) 2.66 N·s , -2.66 N·s 3) 2.66j

ד) 1) 4.66m/s, 6.66 m/s 2) 5.36N·s , -5.36 N·s 3) 0

עבור ציור ג': א) 8kg·m/s ב) 8 kg·m/s ג) 1) 1.33m/s 2) 18.66 N·s, -18.66 N·s 3) 130.69j

ד) 1) -3.33 m/s, 10.67 m/s 2) 37.33 N·s , - 37.33 N·s 3) 0

2. א. 1) 40 m/s 2) 32 m/s 3) 48 m/s ב. 1) 640J 2) 360 J 3) 1000 J

3. 0.0749 m

4. מצב 1: א. 4.724 m/s ב. 3543.31 J מצב 2: א. 1.6 m/s ב. 1993.6 J

5. א. 0.2 m ב. 0.8 m

6. 1) א. $u_1=0$, $u_2=4$ m/s ב. 0.8 m 2) א. u=2 m/s ב. 0.2 m

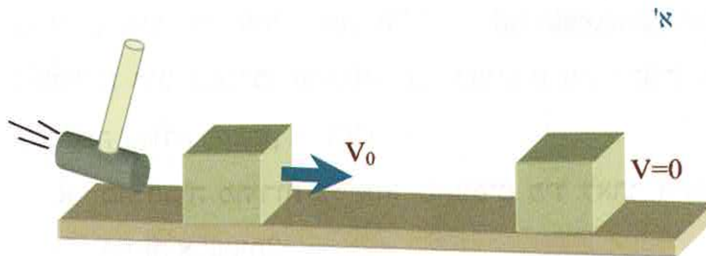
7. 1) 3.33 m/s 2) 8.66 J **8.** א. 0.138 m ב. 0.55 m

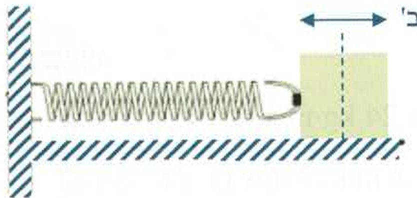
9. א. -4.8 m/s ב. 2.478 m **10.** א. 0 , 10 m/s ב. 0.1 m

11. א. $u_1=0$, $u_2=4$ m/s , ב. 2 N·s

מצב מוכר לכולם הוא כשגוף, המונח על שולחן, מקבל דחיפה, ונע, עד שבסופו של דבר הוא נעצר עקב החיכוך עם השולחן (תרשים א'). מה התרחש פה?

תחילה, עבודה של כוח חיצוני גרמה לעליה באנרגיה הקינטית, ואחרי זמן מה אנרגיה זו פשוט נעלמה...





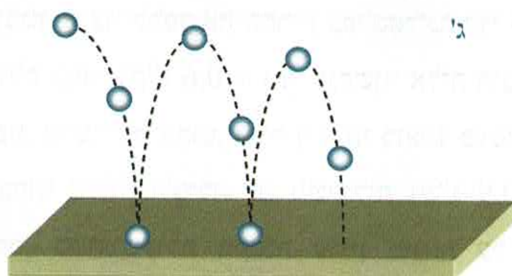
מצב שני, מוכר מאוד, אך שונה מהראשון: משחררים קפיץ מכווץ, והוא מתחיל לנוע (תרשים ב'). לאחר שיגיע למהירות שיא, ימשיך לנוע, עד שיתכווץ למצבו ההתחלתי. למדנו שבמקרה של הקפיץ אנו יכולים לאפיין את מצבו בכך, שהאנרגיה הפוטנציאלית **הפנימית** שלו יחד עם האנרגיה הקינטית מהווים גודל הנשמר. כלומר, במהלך התנועה של הקפיץ, בכל רגע, הירידה באנרגיה הפוטנציאלית תגרום לעליה באנרגיה הקינטית ולהיפך.

אנו רואים, שבמקרה של גוף, הנדחף על השולחן (תרשים א'), אין אנו רואים שימור אנרגיה, אפילו לא בקירוב, ובמקרה של הקפיץ עיקרון זה תופס. מהו ההבדל בין שני המקרים?

כפי שהסברנו, מאחורי סיפור האנרגיה עומדת ההשפעה ההדדית, או פעילות הגומלין, בין הגופים: **אינטראקציה**. בקורס שלנו (שהוא קורס מבוא לפיזיקה) אפיינו את האינטראקציה על ידי **כוח**. הכוחות שפעלו בשני המקרים, שהצגנו, הם כוחות שונים. במקרה של הקפיץ מדובר בכוח אלסטי, שהוא כוח **פוטנציאלי** (אינו תלוי בדרך בין שתי הנקודות אלא רק במיקומן). ובמקרה הראשון מדובר היה על כוח **החיכוך**. ברור, שהעבודה, שהוא מבצע, תלויה בדרך בין נקודות ההתחלה והסוף של התנועה, שכן, ככל שארוכה יותר הדרך, כך גדלה עבודת החיכוך. כלומר, כוח החיכוך **אינו פוטנציאלי**.

עובדה זו מונעת מאתנו להגדיר אנרגיה פוטנציאלית במקרה של חיכוך. עם זאת המחקר הפיזיקאלי רב השנים מראה, שאין זו סיבה לוותר על חוק שימור האנרגיה, אלא, שבמקרים אחרים כמו בכוח החיכוך למשל, יש לחפש אפיק אחר, צורה אחרת של אנרגיה. אנרגיה היא אפיון מצבם של גופים, נחפש עתה איזה סוג אנרגיה אפשר לקשר לעבודת כוח החיכוך.

בעבר דנו במקרה אחר, בו ציינו "איבוד", במובן מסוים, של אנרגיה. היה זה בהקשר לגוף, הנופל מגובה ומתנגש בקרקע. תחילה, בהיותו בנפילה, יכולנו לקשר בין עבודת כוח הכובד להקטנה באנרגיה הפוטנציאלית שלו, ובו זמנית להגדלה באנרגיה הקינטית, כך, שהאנרגיה הכללית (הפוטנציאלית והקינטית) נשמרה. אך לאחר ההתנגשות עם הקרקע (בה עברה אנרגיה קינטית לאנרגיה אלסטית פנימית, וחזרה לאנרגיה קינטית של הכדור המוחזר) אנו עדים לכך, שלא כל האנרגיה הוחזרה לכדור, וזאת על פי הגובה הנמוך יותר של עלייתו המקסימאלית. לאן נעלמה האנרגיה? כנראה נגרם שינוי במצבו של הגוף, איתו היה הכדור הנופל במגע – הקרקע. כלומר, חלק מן האנרגיה עבר למה שמכונה "**אנרגיה פנימית**". פשוט מאוד! אך לא כדאי למהר: **בפיזיקה אין הדברים פשוטים, ולכל הבנה מצטרפים עומק ומורכבות**. נתקלנו אם כן בשאלה, מדוע במקרה אחד, כשמדובר באנרגיה פנימית, יכולנו לקבל אותה חזרה (אנרגיה אלסטית) ובמקרה אחר (חיכוך, התנגשות עם הקרקע) – לא?



בפרק זה נעקוב אחר המרה של אנרגיה לאנרגיה פנימית של הגופים, ונדון בשינויים האפשריים, המאפיינים את **מצב הגוף** כך, שבסוף הפרק נוכל לענות יותר על השאלות, שנשאלו, לגבי מעברי האנרגיה, המלווים שינויים במגוון מצבי הגופים.

אפיון מצב הגוף – טמפרטורה

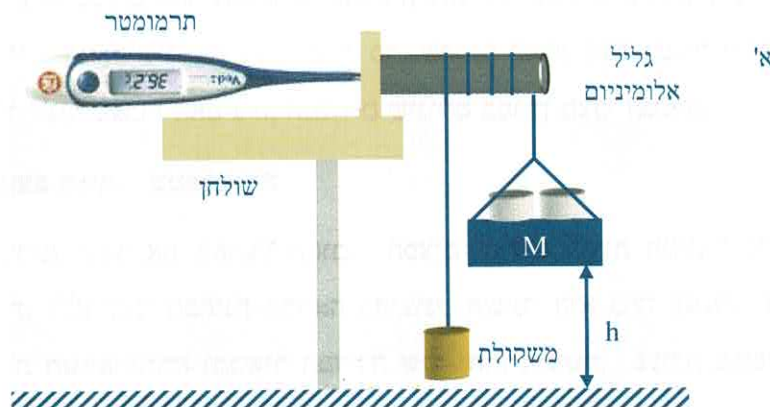
אנו מכירים היטב את תחושת החום. חפצים יכולים להיות חמים יותר או פחות אך להיראות, ללא שוני מבחינת המראה החיצוני; השינוי הוא כולו פנימי. מאפיינים אותו באמצעות **הטמפרטורה** ומכשיר המדידה שלו- **התרמומטר**. פעולת מכשיר זה מבוססת

על תופעות פיזיקאליות שונות, המתרחשות בתוך החומר. נזכיר את התופעה הידועה: התפשטות גופים כתוצאה מחימום. רוב החומרים (אך לא כולם ולא תמיד!) מגיבים לחימום על ידי התפשטות. על עקרון זה בנוי התרמומטר (המכונה גם מד חום. נבקר מונח זה בהמשך). לאחרונה הופיעו מדי חום, המתבססים על כך, שהחימום משנה את תכונות החומר ביחס לזרם חשמלי כלומר, את מוליכות החומר. על בסיס זה בנויים מדי חום דיגיטאליים, אשר מודיעים על טמפרטורה ישירות בסקאלה מספרית.

נלמד על התכונות המעבר של חימום לאנרגיה פנימית מניתוח ההדגמות הבאות.

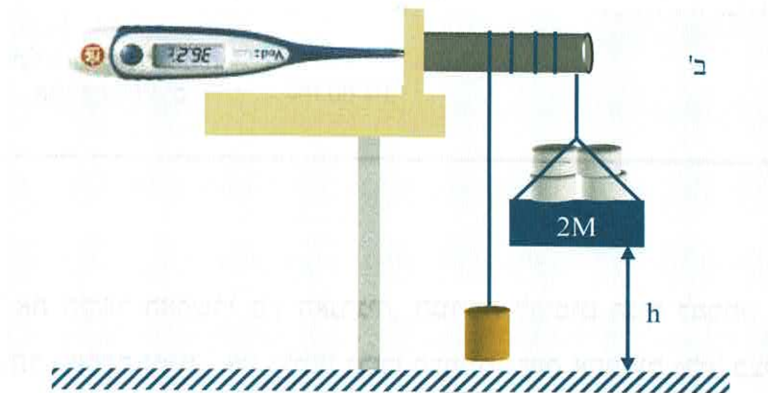
הדגמה 1

נהדק גליל אלומיניום לכן ללא יכולת תנועה. לחריץ הפעור בצידו האחורי נצמיד תרמומטר (רצוי לרפד את החריץ בפלסטלינה כדי לשפר את המגע עם התרמומטר). ניקח משקולת קטנה ($m = 0.6$ ק"ג), ונקשור אליה חוט ניילון. נניח את המשקולת הקטנה על הרצפה, ניישר את החוט, ונכרוך אותו כחמש פעמים סביב גליל האלומיניום. בקצה השני של החוט נתלה סלסילה עם משקולות ($M_1 = 0.9$ ק"ג) בגובה של כ- 1 מטר מעל הרצפה, כשהמשקולת הקטנה עדיין מונחת על הרצפה. (תרשים א'). נרשום את הטמפרטורה של הגליל, ונרפה מהחוט. הסלסילה עם המשקולות תגלוש אל הרצפה, ותגרור את המשקולת הקטנה למעלה. תוך כדי ירידת הסלסילה, החוט ייגרר על פני הגליל עקב המשיכה של החוט על ידי הסלסילה ונגד החיכוך, השורר בין החוט והגליל. לאחר ירידה איטית של הסלסילה, נקרא שוב את טמפרטורת הגליל. הטמפרטורה תעלה במידה מסוימת זאת בעקבות ההמרה של האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית בגודל של: $(M_1-m)\cdot g\cdot h = 0.3\cdot g\cdot h$.



ניתן לגליל להתקרר עד לטמפרטורה ההתחלתית, ונחזור על הניסוי, אלא שהפעם מסת הסלסילה תהיה $M_2 = 1.2$ ק"ג (תרשים ב'). ההמרה של האנרגיה הכובדית תהיה הפעם: $(M_2\text{-}m)\cdot g\cdot h = 0.6\cdot g\cdot h$.

קל לראות, שהכפלנו את כמות ההמרה של האנרגיה הפוטנציאלית.



הניסוי מראה שבמקרה השני קריאת התרמומטר עלתה פי 2 יותר מאשר במקרה הראשון. מאחר שבמקרה זה בעקבות ירידת הסלסילה ועליית המשקולת הקטנה הוכפלה האנרגיה הפוטנציאלית, שהומרה, ניתן אם כן להסיק ש:

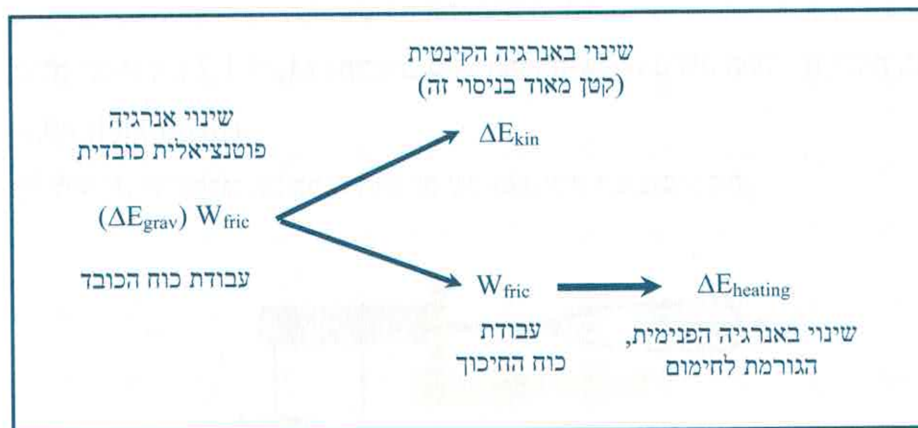
> כמות האנרגיה המושקעת לחימום גוף נמצאת ביחס ישר לשינוי הטמפרטורה שלו.

או, אם נציג את הקשר באופן סימבולי:

$$\Delta E_{heating} \propto \Delta T \qquad (1)$$

כאן סימנו את כמות האנרגיה, המושקעת לחימום הגוף, ב-$\Delta E_{heating}$ וב-ΔT סימנו את הפרשי הטמפרטורה, שקיבלנו בכל פעם.

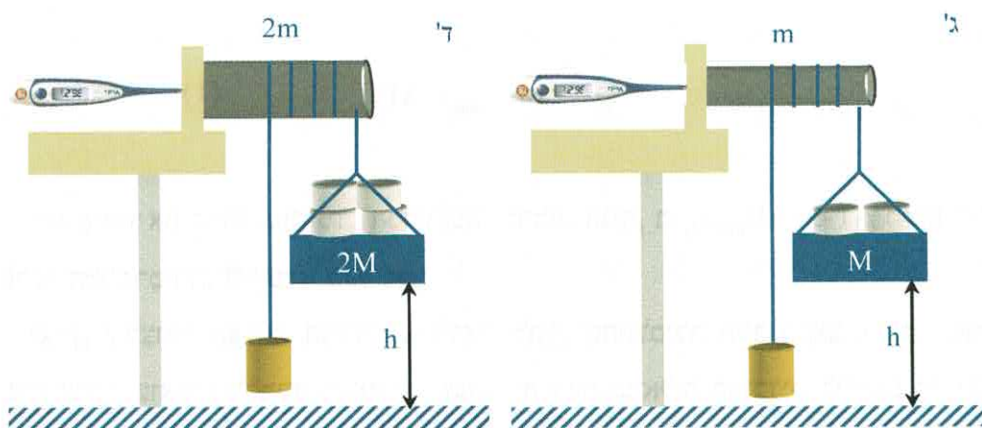
נציין, שלצורך הצלחת הניסוי יש לדאוג לכך, שהסלסילה תרד בקצב איטי. זאת משום שאנו שואפים להמרה מלאה של האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית לחימום הגליל, ולא לאנרגיה קינטית של הסלסילה. ניתן להשיג זאת על ידי שינוי מספר הכריכות סביב הגליל, המשנה את החיכוך בין החוט לבין הגליל. בירידה איטית ניתן להזניח את השינוי באנרגיה הקינטית. נתאר את תהליך ההמרה באופן סימבולי:



הדגמה 2

נבדוק עתה את הקשר האפשרי בין האנרגיה, הגורמת לחימום הגוף למסתו. לשם כך נשתמש באותה מערכת ניסוי. את הניסוי נבצע פעמיים: פעם אחת עם גליל בעל מסה m, בו כבר השתמשנו בניסוי הקודם, ופעם שנייה עם גליל בעל מסה כפולה, 2m. בשני הניסויים נשמור על אותו גובה של ירידת הסלסילה (ועליית המשקולת הקטנה) – 1 מטר.

בניסוי ראשון (תרשים ג') נשתמש בסלסילה עם משקולות, שמסתן 0.9 ק"ג, ובניסוי השני (תרשים ד') נתלה סלסילה עם משקולות, שמסתן 1.2 ק"ג. מערך ניסויים זה, לאור ההסבר בניסוי הקודם, גורם לכך, שכמות האנרגיה (כובדית פוטנציאלית) המומרת לחימום הגופים היא כפולה בניסוי השני (תרשים ג').



נבצע את הניסויים ונקרא את עליית הטמפרטורה בכל ניסוי. הביצוע מורה, שבשני המקרים מתקבלת עלייה זהה של הטמפרטורה. אמנם מידת החימום של הגופים בשני המקרים הייתה זהה, אך כמות האנרגיה המושקעת בחימום הגוף השני הייתה **כפולה**. אם

נחבר תוצאה זו לעובדה, שמסתו של הגליל המתחמם היתה גם היא **פי שניים** גדולה יותר מאשר בניסוי השני, נוכל להסיק, שקיים קשר ישיר בין כמות האנרגיה, הגורמת לחימום הגוף, לבין מסתו (או כמות החומר שבו):

כמות האנרגיה, המושקעת לחימום הגוף, נמצאת ביחס ישר למסתו.

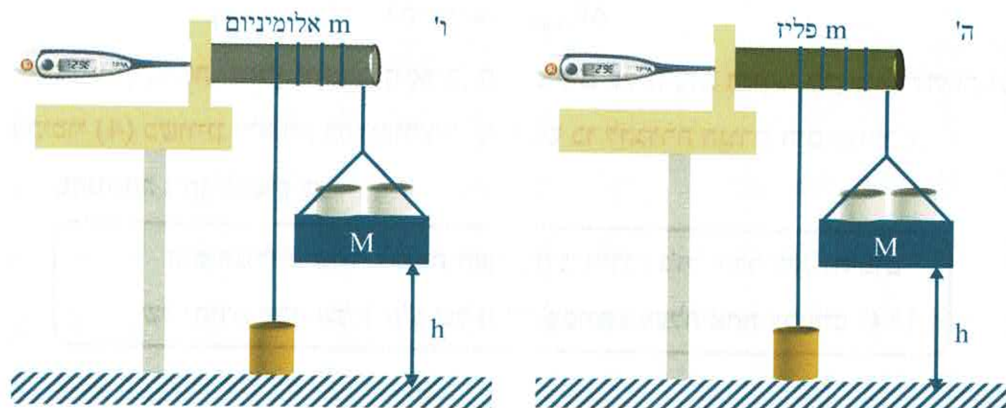
או, אם נציג את הקשר באופן סימבולי:

$$\Delta E_{heating} \propto m \qquad (2)$$

שוב סימנו את כמות האנרגיה, המושקעת לחימום הגוף ב-$\Delta E_{heating}$, וב-m את מסתו של הגוף, המתחמם.

הדגמה 3

בניסויים הקודמים גרמנו לחימום גליל, העשוי אלומיניום. עתה נבדוק האם קיים קשר בין האנרגיה המושקעת לחימום הגוף לבין סוג החומר, ממנו הוא עשוי. לשם כך נשתמש באותה מערכת ניסוי. שוב נבצע שני ניסויים, בהם נדאג לשנות את סוג החומרים המתחממים. בניסוי הראשון (תרשים ה') נשתמש בגליל העשוי **פליז**, ובניסוי השני (תרשים ו') נשתמש בגליל **אלומיניום**. נדאג, שבשני הניסויים לגלילים תהיה אותה מסה, ושבשני הניסויים תומר אותה כמות של אנרגיה פוטנציאלית כובדית. הדבר יושג, אם בשני הניסויים נשתמש במסות היורדות M (1.2 ק"ג) וגובה הירידה h (1מטר).



כמו בכל הניסויים בהדגמות אלו נדאג, שתנועת המשקולות תוך ביצוע הניסויים תהיה איטית. אם נבצע את הניסויים נקבל, שבשני המקרים תתקבל עליית טמפרטורה שונה. בפליז עליית הטמפרטורה תהייה גדולה יותר. על סמך כך נוכל להסיק ש:

> כמויות שוות של אנרגיה, המושקעות לחימום, גורמות לחימום שונה לגופים, שכל השוני ביניהם הוא סוג החומר, ממנו הם עשויים.

נוכל לנסח את המסקנה בדרך אחרת אך שקולה לקודמת:

> כדי לגרום לחימום שווה לשני גופים, הזהים במסתם אך שונים בסוג החומר, יש להמיר כמות שונה של אנרגיה.

או, נוכל להציג את הקשר באופן סימבולי:

$$\Delta E_{heatingt} \propto c \qquad (3)$$

שוב סימנו את כמות האנרגיה, המושקעת לחימום הגוף ב-$\Delta E_{heating}$, וב- c גורם מסוים, אשר יאפיין את סוג החומר, ממנו עשוי הגוף המתחמם. גורם זה מכונה **חום סגולי** של החומר, ועליו נרחיב יותר בהמשך.

ביטוי כולל עבור האנרגיה הפנימית

עתה נחבר את שלוש המסקנות, שהסקנו בהדגמות. נוכל לטעון, שבחימום הגוף האנרגיה המומרת לאנרגיה פנימית של הגוף, שכתוצאה ממנה הגוף מתחמם $\Delta E_{heating}$, תלויה בהפרש הטמפרטורות ΔT, במסה של הגוף m ובחומר ממנו עשוי הגוף:

$$\Delta E_{heating} = c \cdot m \cdot \Delta T \qquad (4)$$

הניסיון מראה, שאין גורמים נוספים, המשפיעים על חימום הגוף. לכן ניתן להשתמש בביטוי (4) כשוויון ולא רק בפרופורציה. נשתמש בו להגדרת הגורם חום סגולי c.

מהנוסחה ניתן להסיק ש:

> חום סגולי c שווה לכמות האנרגיה ביחידות ג'ול, הדרושה לחימום של יחידת מסה של 1 ק"ג של חומר מסוים במעלת אחת צלסיוס $1° C$.

מכאן היחידות של חום סגולי c הן:

$$C = \left[\frac{\text{ג'ול}}{\text{ק"ג} \cdot \text{מעלה צלזיוס}} \right]$$

נציג בטבלה ערכים של חום סגולי לכמה חומרים מוכרים, כפי שנמדדו בניסויים מדויקים.

טבלה: חום סגולי בחומרים שונים

החומר	החום הסגולי $\frac{J}{kg\cdot^{\circ}C}$	החומר	החום הסגולי $\frac{J}{kg\cdot^{\circ}C}$
מים	4,200	ברזל	470
כוהל	2,500	נחושת	400
קרח	2,350	פליז	390
נפט	2,150	כסף	235
אלומיניום	910	כספית	140
חול	840	זהב	135

חימום וחום

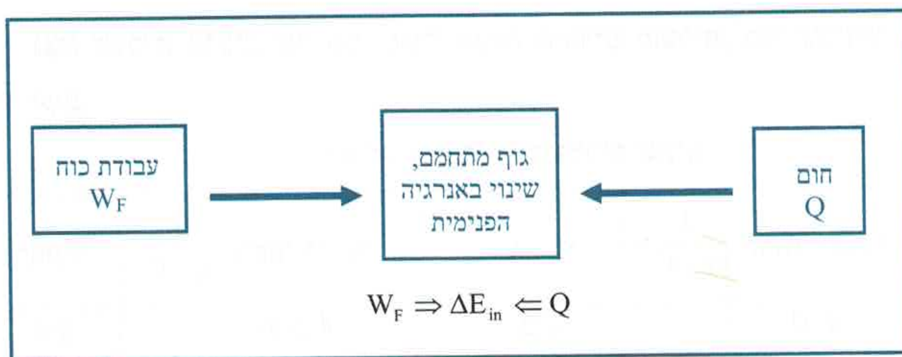
בניסויים, שערכנו, גרמנו לחימום הגופים באמצעות **החיכוך**. דיברנו על האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית, שהייתה מומרת ל**חימום** הגוף, דרך ביצוע **עבודה של כוח** החיכוך. הניסיון היום-יומי מראה, שאין זו הדרך היחידה. באותה מידה ניתן לחמם גופים גם על ידי מגע עם גוף אחר, חם יותר, כלומר, בעל טמפרטורה גבוהה יותר. חימום זה שונה מהותית מהחימום הקודם, שהרי לא בוצעה כל עבודה. במקרה זה מגדירים פיזיקאים מושג חדש – **חום**.

אומרים, ש**חום** עובר מגוף אחד לגוף שני, כאשר הגוף האחד נמצא במגע עם הגוף השני, וכתוצאה מכך הוא מתחמם.

נבהיר יותר את המושגים: קיימות שתי דרכים לחימום הגוף: דרך "**חרוצה**", כלומר, דרך המלווה בביצוע עבודה של כוח כלשהו W_F (למשל שפשוף ידיים), ודרך "**עצלנית**", המלווה במעבר חום Q (למשל, הנחת ידיים על התנור).

חשוב להדגיש, שחום אינו סוג אנרגיה (כמו אנרגיה קינטית, למשל), אלא סוג של מעבר אנרגיה (כמו עבודה). לכן ברור, שכל מה שנאמר בתלות האנרגיה $\Delta E_{heating}$, הדרושה לחימום הגוף באמצעות ביצוע עבודה של כוח W_F, תקף גם לגבי תהליך החימום באמצעות העברת חום Q. כלומר, ניתן לרשום תלות (4) עבור הכמות החום:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$





בפיזיקה **חום** ו**חימום** אינם מושגים שקולים!
חום הוא הדרך ל**חימום** ולא הדרך היחידה.
דרך נוספת אפשרית היא עבודה של כוח.

קיבול חום

הגדרנו את הגודל **חום סגולי** שהוא אפיון סגולי של החומר, כלומר מאפיין תכונה של יחידת מסה. למטרות פרקטיות, כאשר תכונת הגוף היא החשובה, ולא החומר, ניתן להגדיר אפיון אחר: קיבול החום. אפיון זה מוגדר ככמות האנרגיה, הדרושה לחימום של גוף מסוים כולו במעלה אחת: קיבול חום (H). ניתן לרשום עבור קיבול חום:

$$\Delta E_{heating} = H \cdot \Delta T \qquad (6)$$

ברור, שאת קיבול החום ניתן לקבל מהידע של החום הסגולי והמסה של הגוף:

$$H = c \cdot m \qquad (7)$$

פירושו של ביטוי (7) הוא, שקיבול החום כולל בתוכו את התלות של האנרגיה הדרושה לחימום הן בכמות החומר והן בסוג החומר.

מכאן היחידות, בהן נמדד קיבול החום: ק"ג/ג'ול.

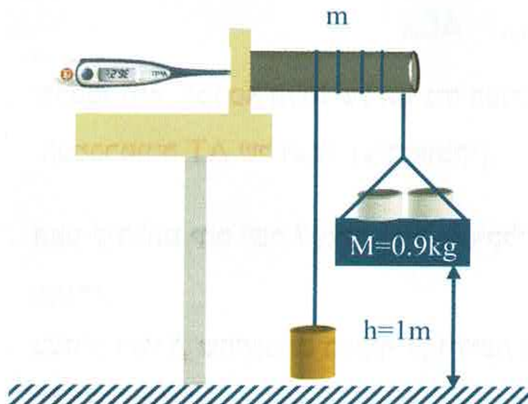
נציין גם, שעל סמך שתי ההדגמות הראשונות ניתן היה להגיע ישירות לביטוי (6) ולמושג קיבול חום ללא חום סגולי. ברור, שאין ביטוי זה מבטא את מלוא המידע הנמצא בביטוי (4).

הערה בנוגע למונחים: המונחים **חום**, **חום סגולי**, **קיבול החום** יכולים להטעות, כי הם אינם מבטאים בדיוק את משמעותם. ההגדרות, שניתנו לחום סגולי ולקיבול חום אינם חייבות להיות חום בכלל, אלא מהווים כמות אנרגיה מסוימת. גם את החום לעיתים קרובות מבלבלים עם חימום ואנרגיה. כפי שציינו, חימום הוא תהליך, בו עולה האנרגיה הפנימית של הגוף, ועולה גם הטמפרטורה שלו. חום הוא אופן מעבר האנרגיה ולא אנרגיה.

כל הדקויות האלה הן שרידים של התקופות, בהן לא הובנה בדיוק מהות החום כתופעה פיזיקאלית, ואנשים שייכו את תכונת הגופים להיות חמים או קרים לנוכחות של חומר מסוים, שכונה בשם "קלוריק" ("חום"). מכאן מאוד הגיוני, שהמושג "קיבול חום" הופך להיות מאפיין של יכולת הגוף לכלול את הקלוריק. הוגדרה גם יחידה מיוחדת למדידה - קלוריק ("קלוריה"), בה השתמשו בפיזיקה עד לזמן האחרון. בתחומים אחרים נמשך השימוש ביחידה זו מתוך הרגל חזק במיוחד. כך למשל מאפיינים את האנרגיה הזמינה באוכל מסוים בקלוריות.

ניסוי חקר – אימות הביטוי עבור השינוי באנרגיה הפנימית, ומציאת חום סגולי

מטרת הניסוי: לקבוע באופן כמותי את הקשר בין שינוי האנרגיה הפנימית לטמפרטורה, ובנוסף, לקבוע את ערכו של החום הסגולי של אלומיניום.



הציוד הנדרש: כן, גלילי אלומיניום, חוט ניילון, משקולת (0.06 ק"ג), משקולת (0.3 ק"ג), סלסלה, תרמומטר, פלסטלינה, סרגל.

מהלך הניסוי:

1. נרכיב את המערכת, כמתואר בהדגמה מס' 1 (ראה תרשים). נברר את מסת גליל האלומיניום (m), ונרשום אותה במחברת.
2. בכל שלב של הניסוי יש לדאוג לכך,שגובה הסלסילה יהיה 1 מטר מעל הרצפה, ועל המשקולת הקטנה להיות מונחת על הרצפה, כשהחוט המחובר אליה מתוח. את מספר

משקולות בסלסלה נשנה בהדרגה, ונבדוק בתחילתו של כל שלב את הטמפרטורה ההתחלתית של גליל האלומיניום ($T_1°$), ואת הטמפרטורה, המתקבלת לאחר ירידת הסלסילה לרצפה ($T_2°$).

$\Delta T_0 = T_2° - T_1°$	$T_2°C$	$T_1°C$	$\Delta E_{grav} = G \cdot h$	M [kg]
				0.9
				1.2
				1.5
				1.8
				2.1

3. נניח בתוך הסלסילה שלוש משקולות ($M =$ 0.9 ק"ג) ונרשום בטבלה את הטמפרטורה ההתחלתית $T_1°$. נרפה מחוט הניילון, ונדאג לכך שהסלסילה תרד באיטיות. לאחר הירידה נרשום את הטמפרטורה החדשה $T_2°$.

4. אחרי שגליל האלומיניום יחזור לטמפרטורה ההתחלתית, נחזור על הניסוי עבור מספר שונה של משקולות. בכל פעם נוסיף משקולת אחת.

5. תארו את מעברי העבודה-אנרגיה- בניסוי, והראו, שבהזנחת האנרגיה הקינטית נקבל:

$$\Delta E_{grav} = \Delta E_{in}.$$

6. שרטטו גרף, המבטא תלות של אנרגיה הפנימית (ΔE_{in}) (ציר אנכי) בעליית הטמפרטורה ΔT של הגוף (ציר אופקי).

7. האם קיבלתם יחס ישר ? איזה גודל פיסיקלי מבטא היחס $\frac{\Delta E_{in}}{\Delta T}$? חשבו את ערכו מהגרף.

8. בעזרת הגודל, שחישבתם בסעיף 7, וידיעת המסה של הגליל, מצאו את החום הסגולי של האלומיניום.

9. השוו את ערכו של החום הסגולי, שקיבלתם, לערך המופיע בטבלה שבפרק זה. אם קיים הבדל בין הערכים, ציינו את הגורמים האפשריים לכך.

10. האם הצלחנו לאמת את הביטו עבור השינוי באנרגיה הפנימית? הסבירו זאת.

חשיבותו של החום

חום הוא בין המושגים החשובים ביותר לקיומנו . נפרט מספר היבטים חשובים של נושא זה.

★ תחילה, כמובן, נציין שחום הוא תנאי לעצם **קיום החיים.** לבעלי- חיים מסוימים (היונקים) ולבני- האדם (הנכללים במין ביולוגי זה), יש יכולת שימור של טמפרטורה מסוימת של הגוף (וויסות חום). תכונה זו מאפשרת תהליכים שונים ותגובות כימיות, המהוות את תהליך החיים. שינוי קטן, למשל של מעט יותר משבע מעלות בטמפרטורת גוף האדם, גורם למוות. יכולת וויסות החום היא יתרון אדיר לעומת חיות שאינן בעלות יכולת זו. כך למשל הזוחלים. משערים, שבקטסטרופה, שפקדה את כדור הארץ לפני מיליוני שנים, כאשר התרחשה התנגשות עם כוכב שביט, החלה בעקבות האירוע תקופה של חשיכה ושל שינוי אקלים. הזוחלים הגדולים שלא היה להם מנגנון וויסות החום, לא שרדו תקופה זו. השליטה בסביבה עברה ליונקים, ובסופו של דבר- לאדם.

חימום הגוף נעשה באמצעות המרת אנרגיה בתגובות כימיות מורכבות. עם זאת, יכולת חימום גוף האדם היא מוגבלת, ועליו לדאוג לחימום באמצעים אחרים, כגון כיסוי גופו בבגדים (פרווה, בד וחומרים אחרים). גם זה, כמובן, אינו מספיק, והאדם המציא מכשירי חימום רבים ומגוונים (תנורים, מיזוג אוויר).

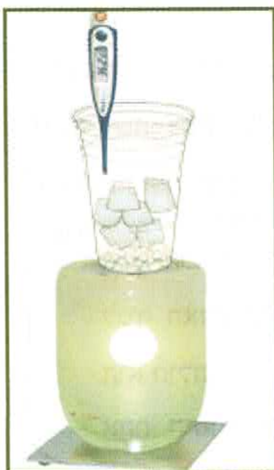
באותה מידה של חשיבות על אדם לדאוג גם לקירור, בשעה שהטמפרטורה הפנימית של הגוף עולה. הורדת חום הגוף מתבצעת באופן טבעי על יד הזעה (אידוי הזיעה גורם לאיבוד חום). גם כאן וויסות החום הטבעי אינו מספיק, ועל אדם לדאוג לקירור הסביבה ולשמירה על טמפרטורה בסביבות ה- 20°C, כי בסביבה זו תפקודו של האדם היה היעיל ביותר גם מבחינה פיזיולוגית וגם מבחינת היכולת לחשוב. ניתן להגיד, שהמצאת מכשיר מיזוג האוויר שינתה באופן מהותי ביותר את איכות החיים, ואת החברה האנושית כולה, וזאת רק לפני עשרות שנים.



תנאי הכרחי לקיום חיים הוא טמפרטורת גוף כמעט קבועה. לגוף האדם יכולת של וויסות החום. אנו יודעים, שאדם הוא חולה, כאשר טמפרטורת הגוף שלו סוטה ביותר ממעלה אחת. חימום יתר של הגוף מסיבה כלשהי הוא קטלני לאדם.

* **הוספה והורדה של חום** היא דרך לגרום למעבר בין מצבי הצבירה השונים של החומר. הרתחת מים והתכת מתכות, למשל, נעשות על ידי **הוספת חום**. חימום מאפשר ליצור חומרים כגון מתכות ונתכים (תערובת של מתכות) שונים. ומנגד – פעולות המקרר ומיזוג האוויר נעשות על ידי **הורדת חום.**
* במכונות רבות מומרת אנרגיה מסוג כלשהו לחום, ודרכו- לאנרגית תנועה (מכונת ירי, טורבינות בתחנות כוח), או לביצוע עבודה מכאנית (מכונת חום כמו קטר, מנוע שריפה פנימית). ניתן להציג שרשרת זו של מעברים באופן הבא: $\Delta E \Rightarrow Q \Rightarrow W$.
* מעבר חום גורם ל**השוואת הטמפרטורה** בתוך הגוף ובמרחב שלם של מתחם, גם כאשר מחממים רק חלק ממנו. למשל, כאשר מבשלים על האש, חימום הסירים נעשה רק בדופן הבסיס, אך הטמפרטורה עולה בכל הסיר. חימום מבנים מתבצע על ידי תנור, הממוקם במבנה, וגורם לחימום של כל המתחם. התהליך שמתרחש הוא **מעבר חום.**
* תהליכים כימיים מתחלקים לשני סוגים: האחד דורש חום לעצם ההתרחשות. תהליך זה מכונה בשם **תהליך אנדותרמי.** תהליך מסוג **אכזותרמי** גורם לפליטת חום (פצצות, דלק כימי וכד'). שריפה היא מקרה פרטי של תהליך אכזותרמי, שבו מתבצעת תגובה כימית בין חומר כלשהו לחמצן. תהליך זה מלווה בפליטת חום. לשריפה חשיבות רבה ביותר בהתפתחות האדם בכל התרבויות בהיסטוריה. שריפה של עץ היא דוגמא מייצגת. כדי לגרום לתחילת התהליך דרושה טמפרטורה גבוהה יחסית, אך לאחר התחלתו, השריפה הנמשכת מלווה בפליטת חום רב.

מצבי הצבירה של החומר



כאמור, בעקבות הוספה או הורדה של חום, עולה או יורדת הטמפרטורה של הגופים, אך לא רק זאת. אחד התהליכים החשובים, המתרחש באותן נסיבות, הוא המעבר בין מצבי הצבירה של החומר. נתרשם מהתהליך בניסוי הבא:

לתוך כלי, המכיל מים, נכניס 100 גרם קוביות קרח ותרמומטר (ראה תרשים). נחמם את הכלי בעזרת מקור חימום כלשהו.

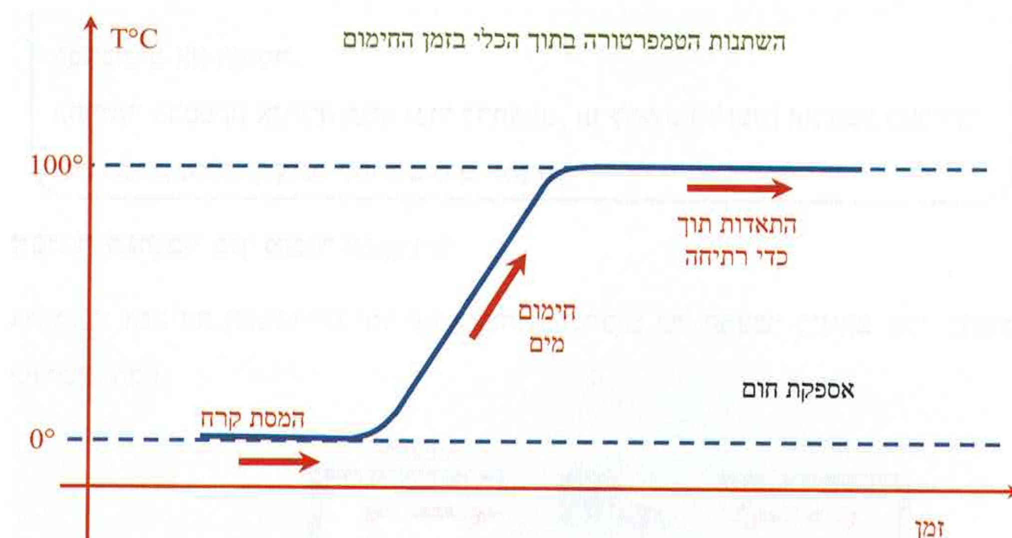
תוך כדי הניסוי ניתן להבחין במספר שלבים, בהם ניתן לראות שינויים פיזיקאליים בולטים:

שלב א': כל עוד נשאר קרח בכלי, הטמפרטורה אינה משתנה כלל.

שלב ב': לאחר שהקרח נמס כולו, הטמפרטורה בתוך הכלי עולה באופן מתמיד, עד שהמים מתחילים לרתוח.

שלב ג': כאשר המים רותחים, פעולת המקור נמשכת, והאדים יוצאים מתוך הכלי, טמפרטורת המים אינה משתנה.

מאחר שבמהלך כל הניסוי סופק חום לתוך הכלי, התהליכים התרחשו כתוצאה מעליית האנרגיה הפנימית של המים בתוך הכלי. בשלב ראשון השינוי באנרגיה הפנימית בא לידי ביטוי בהמסת הקרח, ובשלב השלישי שינוי זה מתבטא ברתיחת המים. אלה הם שינויי מצב הצבירה ממוצק לנוזל (המסה) ומנוזל לגז (אדים) (הרתיחה). רק בשלב חימום המים השינוי באנרגיה הפנימית עקב חימום המים התבטא בשינוי בטמפרטורה. מכאן אנו יכולים



להסיק, שעליית הטמפרטורה אינה המאפיין היחיד של שינוי באנרגיה פנימית. המאפיין הנוסף הוא **שינוי במצב הצבירה** של החומר. נתאר באופן גרפי את שינויי הטמפרטורה כפי, שנמדדו בתוך הכלי:

נתאר עתה שינוים אלה במונחים של אנרגיה:

בעת השינוי במצב הצבירה משתנה הסידור המרחבי של המולקולות, המרכיבות את החומר ומתרחש שינוי מבחינת היחסים ביניהן. המולקולות כוללות מטענים חשמליים, אשר מושכים ודוחים זה את זה. מתבצעת עבודה על ידי הכוחות החשמליים. כאשר

השינוי באנרגיה הפנימית נעשה ללא שינוי במצב הצבירה, עולה האנרגיה הקינטית של החלקיקים, המרכיבים את החומר, והמולקולות מקיימות תנועות ותנודות לא מסודרות. תנועות אלה אינן נראות מחוץ לחומר, והביטוי החיצוני לקיום תנועות אלה ולהגדלת תנועה זו הוא עליית הטמפרטורה.

נסכם את האפשרויות לשינוי אנרגיה פנימית של גוף בתרשים הבא:

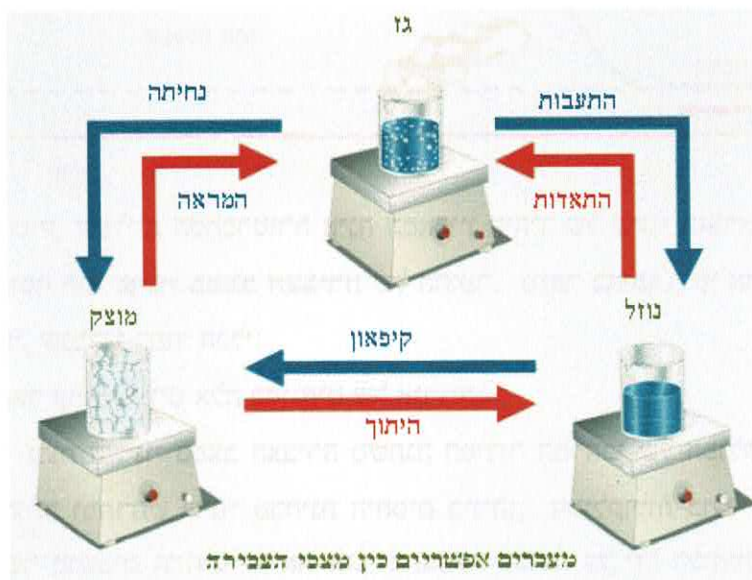


הוספת חום לגוף או עבודה על הגוף גורמת לשינוי באנרגיה הפנימית של החלקיקים, המרכיבים את החומר.

כתוצאה מהספקת אנרגיה הגוף יכול להתחמם, או לחלופין לשנות את מצב הצבירה שלו. שני התהליכים אינם מתרחשים בו זמנית.

אפיוני המעבר בין מצבי הצבירה

את מצבי הצבירה האפשריים יחד עם שמות התהליכים של המעבר ביניהם נוכל להציג בתרשים הבא:



מעברים אפשריים בין מצבי הצבירה

ברור, שמבחינה כמותית שינויים במצב הצבירה תלויים בסוג הקשרים הפנימיים בין חלקיקי החומר, כלומר, באפיון כמותי של התהליכים חייבת להופיע התלות בסוג החומר. נגדיר כמה מאפיונים אלה:

תחילה נפנה למעבר בין מצב מוצק לנוזל (היתוך) ולהיפך – בין נוזל למוצק (קיפאון). שני התהליכים הם הפוכים, ומתרחשים באותה טמפרטורה. סוג התהליך נקבע כשאנרגיה מסופקת למערכת, או כשאנרגיה נלקחת ממנה. בטמפרטורת המעבר החומר נמצא בו זמנית בשני מצבים. האפיונים הם:

חום היתוך (סגולי) - כמות החום הדרושה כדי להעביר 1 ק"ג של חומר מסוים ממצב מוצק למצב נוזלי.

הטמפרטורה , בה נעשה מעבר זה, מכונה **נקודת היתוך.**

חום קיפאון (סגולי) - כמות החום, שתשתחרר, כאשר 1 ק"ג של חומר מסוים יעבור ממצב נוזלי למצב מוצק.

הטמפרטורה, בה נעשה מעבר זה, מכונה **נקודת קיפאון.**

כאמור, תהליכי היתוך וקיפאון הם תהליכים הפוכים, ולכן ניתן לטעון, שחום קיפאון וחום היתוך שווים, וזאת מתוך שיקולי שימור אנרגיה. שני התהליכים גם מתרחשים באותה טמפרטורה.

חום היתוך = חום קיפאון

תהליכי היתוך וקיפאון מלווים בשינוים בסידור הפנימי של חלקיקי החומר. שינוי זה גורם לשינויי בצפיפות החומר ועקב שימור החומר, גם לשינוי בנפח הגוף, העובר ממצב צבירה אחד לשני. חומרים אחדים עולים בצפיפותם במעבר מנוזל למוצק, אך אחרים מראים התנהגות הפוכה (ביניהם מים).

בדומה, לגבי המעבר בין מצבי הצבירה נוזל וגז ניתן לאפיין את המעבר על ידי:

חום התאדות (סגולי) - כמות החום הדרושה כדי להפוך 1 ק"ג של נוזל מסוים לגז בתהליך של רתיחה. הטמפרטורה, בה נעשה מעבר זה, מכונה **נקודת רתיחה.**

חום התעבות (סגולי) - כמות החום, שתשתחרר, כאשר 1 ק"ג של חומר יעבור ממצב של גז למצב של נוזל. הטמפרטורה שבה נעשה מעבר זה מכונה **נקודת התעבות.**

גם כאן, מאחר שההתאדות וההתעבות הם תהליכים הפוכים, ניתן לקבוע, ששני התהליכים מתרחשים באותה הטמפרטורה ו-:

חום ההתאדות = חום ההתעבות

צריך לציין, שבמציאות הפיזיקאלית המעברים בין מצבי הצבירה השונים בחומר הם מאוד מורכבים, והם מטופלים רק במסגרת תורת הקוונטים. לא קיים שום הסבר פיזיקאלי נכון לתהליכים אלה במסגרת הפיזיקה הקלאסית.

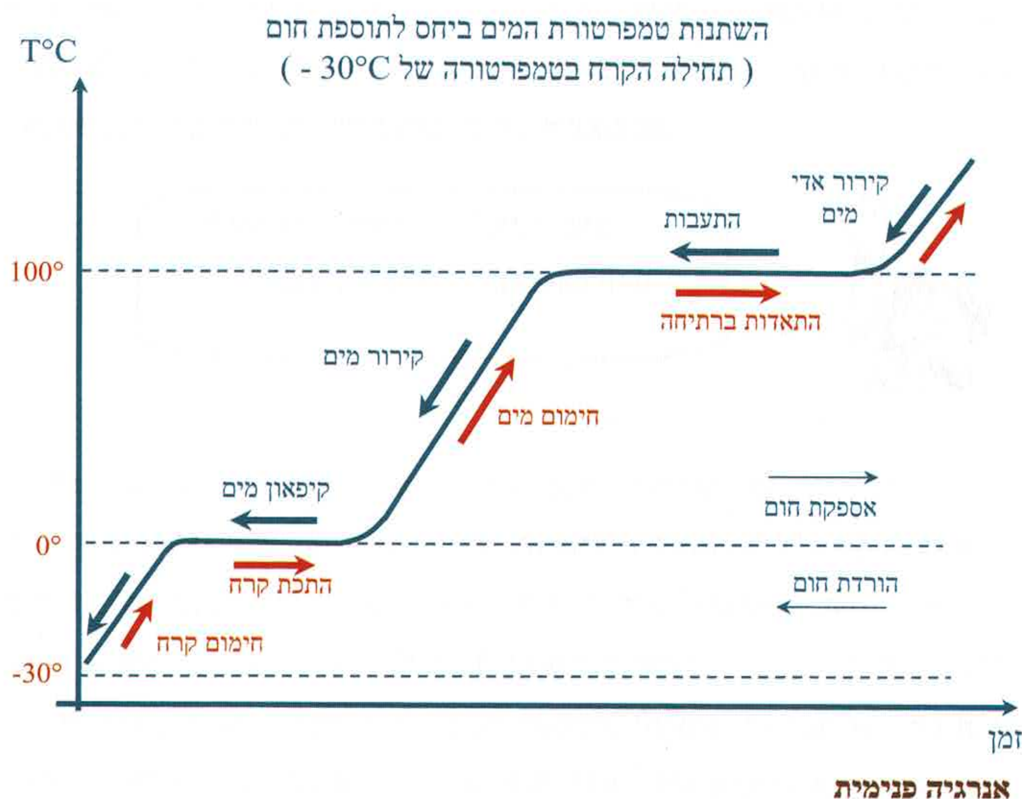
כעדות לכך נציין, שישנם חומרים (דוגמת יוד, פחמן דו חמצני (CO_2)), שתוך כדי חימום עוברים ישירות ממצב מוצק למצב גז. למעבר זה קוראים: **המראה** (סובלימציה). כמובן ייתכן גם מצב הפוך, כאשר חומרים עוברים ממצב גז ישירות למצב מוצק (**נחיתה**).



הגדלים שסקרנו: חום היתוך, חום קיפאון, חום התאדות (התעבות) כולם מאפיינים את מעברי החומר בין מצבי הצבירה השונים. גדלים אלה מכונים בשם כללי: **חום כמוס.**

מקור השם הוא בעובדה, שבמשך תקופה ארוכה לא היה ידוע מה קורה בתוך החומר, כאשר הוא הופך לגז, לנוזל או למוצק.

נסיים בכך, שנתאר יחד את כל מעברי מצבי הצבירה בגרף מייצג של תלות הטמפרטורה בזמן הוספת אנרגיה לגוף מחומר מסוים. תהליך הפוך יתואר על ידי אותו גרף, כאשר קוראים אותו בכיוון הפוך בציר האופקי.



אנרגיה פנימית

אנו עדים למצב, בו ניתן לשנות את האנרגיה הפנימית של הגוף, בין אם בהשקעת עבודה ובין אם בהספקת חום. אולם, יכולים להיות מצבים, שניתן לקבל בהם את האנרגיה, שהושקעה, בחזרה במלואה, כגון, כאשר מכווצים קפיץ (ואוגרים אנרגיה פוטנציאלית אלסטית), או כאשר גורמים למעבר בין מצבי הצבירה של הגוף (גם פה המצב דומה: חום כמוס של היתוך שווה לחום כמוס של קיפאון). לעומת זאת, כאשר גורמים לעליית הטמפרטורה של הגוף, לא ניתן לקבל בחזרה את מלוא ההשקעה בקירור הגוף. כמו כן גם לא ניתן להגדיר את המושג אנרגיה פוטנציאלית עבור כוח החיכוך. מדוע?

מתברר שהמונח "אנרגיה פנימית" הוא כולל מידי. כך, כשבתהליך מדובר בכוח פוטנציאלי חשמלי, הפועל בין חלקיקים מסודרים במבנה פנימי מוגדר של החומר, אכן

ניתן לקבל את ההשקעה של האנרגיה חזרה במלואה. ואם מדובר במעבר אנרגיה של קבוצה גדולה של חלקיקים, שאינם מסודרים במבנה פנימי מוגדר, ומצויים בתנועה אקראית, כמו בגז (גם בתוך מוצק ישנן תנועות כאלו), אז לא ניתן לקבל חזרה את מלוא האנרגיה. העיקרון נראה די מובן:

מעבר אנרגיה מסדר לסדר הוא הפיך, והמעבר מסדר לאי- סדר ("בלגן") אינו הפיך. במובן של שימור האנרגיה- דרושה אנרגיה נוספת. החוקיות במעברים כאלה חשובה מאוד על מנת לשלוט במכונות חום מסוגים שונים. תחום זה, מעניין וחשוב מאוד לאנושות, נחקר בתורה פיזיקאלית המכונה **תרמודינאמיקה**.

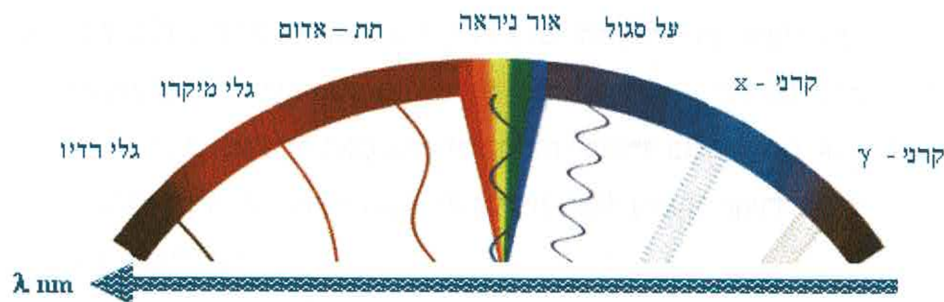


לעבור מסדר לבלגן? – זו אינה בעיה.

לעבור מבלגן לסדר? – זו בעיה אמיתית!

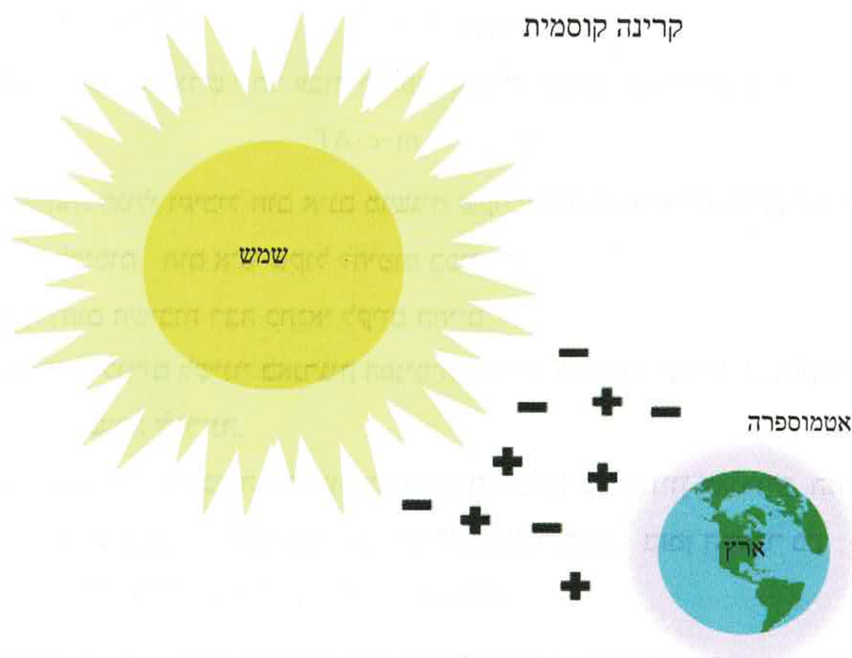
לאור זאת כדאי גם לדייק במושגים: את האנרגיה הפנימית, הקשורה לקשרים שבין החלקיקים המרכיבים את הגוף, מכנים "**אנרגיה פנימית פוטנציאלית**" – $E_{\text{internal}}^{\text{potential}}$ (אותה ניתן להמיר חזרה בתהליך הפוך). את האנרגיה הפנימית של החלקיקים, המצויים בתנועה אקראית, אנרגיה קינטית, מכנים "**אנרגיה פנימית תרמית**" – $E_{\text{internal}}^{\text{thermal}}$ (אותה לא ניתן להמיר חזרה במלואה). לפעמים מכנים את האנרגיה התרמית, גם בשם **אנרגיית חום**, היות **וחום** בלועזית הוא "**תרמו**", ולכן המונחים לכאורה נראים שקולים. עם זאת, כדאי בכל זאת להיצמד למונח אנרגיה תרמית, $E_{\text{internal}}^{\text{thermal}}$, בגלל הבלבול התמידי בין המושגים **חום** (לא אנרגיה, אלא דרך מעבר אנרגיה) **ואנרגיית חום**. בכל מקרה רק הבנה של המושג יכולה לעזור. כך, חשוב מאוד לשייך את **הטמפרטורה** למדד ל**אנרגיה פנימית תרמית** ולא לחום.

נעיר בסוף גם על קיום דרך שלישית לשינוי באנרגיה הפנימית של הגופים: **בליעה ופליטה** של **קרינה** (מדובר בעיקר בקרינה אלקטרומגנטית, ששייכים אליה אור, גלי רדיו, גלי מיקרו, גלי תת-אדום ועל סגול, גלי רנטגן וגלי גמא). זאת בנוסף לעבודת כוח על הגוף, והספקת חום.



תהליכים אלה נגרמים עקב שינוי מצבם של החלקיקים המרכיבים את החומר (אטומים ומולקולות). תהליך, בו מעורבת קרינה, אינו דורש מגע בין הגופים, אם כי לא צריך לשכוח, שגם אינטראקציה כובדית, חשמלית ומגנטית אינן דורשות מגע כזה. כמובן, לא ניתן להתעלם מהקרינה בכל התופעות, הקשורות לחיי היום יום (אנו חייבים את החיים לשמש, הקורנת קרינה שמגיעה לכדור הארץ ולא לעבודה או לחום), אך במסגרת קורס זה אנו חייבים להסתפק רק בהערה על הצורך להתחשב בהספקה ובאיבוד האנרגיה עקב הפליטה והבליעה של קרינה.

לכן, בהגדרת האנרגיה כאפיון מצב של גוף, או של מערכת גופים, המשנה את גודלו עקב ביצוע עבודה או הספקת חום, יש להוסיף גם את האופן השלישי של שינוי האנרגיה – קיום הקרינה.



סיכום הפרק

1. אנרגיה פנימית היא מושג, המאפיין את מצב החלקיקים, המרכיבים את הגופים ואת החומרים השונים. אנרגיה זו כוללת את: האנרגיה הקינטית של התנועות הפנימיות האקראיות (לא ניתנת להחזרה באופן מלא), אנרגיה תרמית פנימית ואנרגיה פוטנציאלית פנימית (אשר ניתנת להחזרה באופן מלא בתהליך הפוך).
2. טמפרטורה היא מדד לאנרגיה פנימית תרמית של החלקיקים, המרכיבים את החומר בכל מצב צבירה.
3. מעבר אנרגיה מגוף חם לגוף קר יותר, הנמצא במגע איתו, מכנים **חום**. המושג חום מקביל למושג עבודה. מקורו של חום הוא מעבר אנרגיה עקב התנגשויות של החלקיקים המרכיבים את הגופים, ומצויים בתנועה תרמית אקראית.
4. חום סגולי: כמות האנרגיה, הנדרשת לגוף שמסתו 1 ק"ג, תוך כדי חימומו של הגוף במעלה אחת צלסיוס.
5. חימום גוף (שינוי באנרגיה פנימית שלו) ניתן לבצע בדרך של עבודה של כוח W_F ("דרך חרוצה"), או בדרך הספקת חום Q ("דרך עצלנית").

$$W_F \Rightarrow \Delta E_{in} \Leftarrow Q$$

6. קיבול חום הוא כמות האנרגיה, הנדרשת לגוף בעל מסה מסוימת להתחמם במעלה אחת צלסיוס: $\Delta E_{heating} = H \cdot \Delta T$
7. הביטוי המפורש יותר עבור תוספת אנרגיה פנימית הגורמת לחימום:

$$\Delta E_{heating} = m \cdot c \cdot \Delta T$$

8. חום סגולי וקיבול חום אינם מושגים שקולים לחום, אלא לאנרגיה, הדרושה לחימום. חום אינו שקול לחימום בפיזיקה.
9. לחום חשיבות רבה כתנאי לקיום החיים.
10. ניתן לגרום לשינוי באנרגיה הפנימית של גוף גם בדרך שלישית, כלומר בחשיפה לקרינה.
11. מעברי מצב צבירה הם מעברים הפיכים, במובן של שוויון האנרגיה, הנדרשת לקיום המעבר, והאנרגיה המשתחררת במעבר הפוך. בזמן המעבר בין מצבי הצבירה, הטמפרטורה אינה משתנה.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1) חום סגולי של חומר הוא:

א. כמות האנרגיה, הגורמת לעלייה בטמפרטורה של חומר ב- $1°C$.

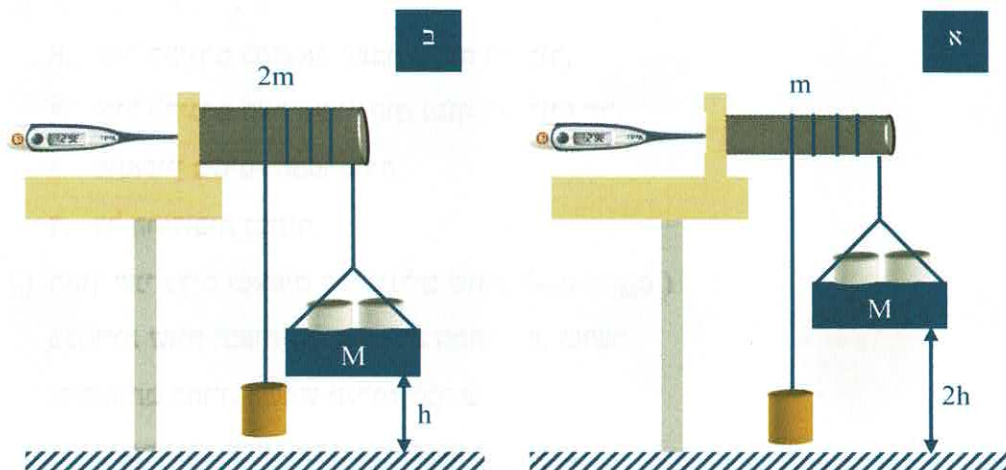
ב. כמות החום, הגורמת למסה של 1 ק"ג חומר עלייה בטמפרטורה של $1°C$.

ג. עליית הטמפרטורה, הנגרמת לגוף, כאשר עוברת אליו כמות חום של 1 ג'ול.

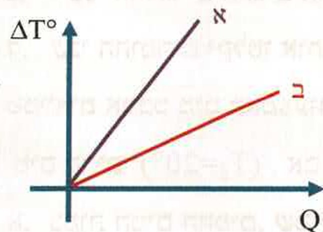
ד. כל התשובות אינן נכונות.

2) משקולת, שמסתה M, יורדת באיטיות מגובה h. תוך כדי ירידתה היא גורמת לעלייה בטמפרטורה בשעור של ΔT לגליל נחושת, שמסתו m (מצב א'). אם המסה M תרד באטיות מגובה 2h (מצב ב'), היא תגרום לגליל נחושת בעל מסה כפולה לעלייה בטמפרטורה של:

א. $4\Delta T$ ב. $2\Delta T$ ג. ΔT ד. $0.5\Delta T$



3) הגרף הבא מתאר את עליית הטמפרטורה כפונקציה של כמות החום, הנוספת לשני גופים שמסתם זהה והם עשויים מחומרים שונים. האם נכון ש:



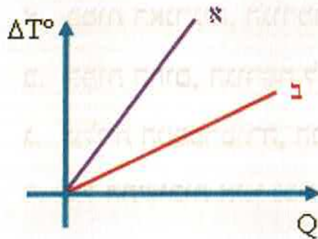
א. החום הסגולי של גוף א' גדול יותר?

ב. החום הסגולי של גוף ב' גדול יותר?

ג. החום הסגולי של שני הגופים זהה?

ד. לא ניתן לדעת לאיזה גוף חום סגולי גדול יותר?

4) מחממים בשני כלים שונים אותו החומר. הגרף הבא מתאר את עליית הטמפרטורה כפונקציה של כמות החום שעברה לחומר. האם נכון ש:



א. מסתו של החומר שבכלי א' גדולה יותר?

ב. מסתו של החומר שבכלי ב' גדולה יותר?

ג. מסת החומרים בשני הכלים שווה?

ד. לא ניתן לדעת באיזה כלי יש יותר חומר?

5) החום הסגולי של חומר תלוי:

א. בשיטת המדידה.

ב. בכמות החום, הגורמת לעליית הטמפרטורה

ג. בטמפרטורה, בה נמצא החומר.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

6) שינוי באנרגיה פנימית:

א. יכול להיגרם כתוצאה מעבודת כוח החיכוך.

ב. יכול להיגרם בעת מעבר חום מגוף חם לגוף קר.

ג. מתאפיין בשינוי טמפרטורה.

ד. כל התשובות נכונות.

7) בתוך שני כלים נמצאים שני נוזלים שונים ($c_{\text{מים}} < c_{\text{נפט}}$) בכמויות שוות ובאותה טמפרטורה התחלתית. כאשר נניח אותם בחוץ, השמש תגרום לכך ש:



א. טמפרטורת הנפט תהיה נמוכה מזו של המים.

ב. טמפרטורת המים תהיה גבוהה מזו של הנפט.

ג. לשני החומרים תיגרם אותה עלייה בטמפרטורה.

ד. שני החומרים יקלטו אותה כמות חום.

8) ממלאים אמבט מים באמצעות שני ברזים, האחד מספק מים חמים ($T_1=60^\circ$), והשני- מים קרים ($T_2=20^\circ$) . אם הטמפרטורה, המתקבלת באמבט, גבוהה מ- 40°C:

א. כמות המים החמים, שמילאנו באמבט, גדולה יותר מאשר הקרים.

ב. כמות המים הקרים, שמילאנו באמבט, גדולה יותר מאשר המים החמים.

ג. לא ניתן לדעת, מאיזה ברז זרמה כמות מים גדולה יותר.

ד. משני הברזים זרמה אותה כמות מים.



אנרגיה פנימית וחום

1. מה ההבדל בין חום סגולי לקיבול חום ?

2. האם החום הסגולי של חול על פני המאדים שונה מזה שעל פני כדור-הארץ ? (מדובר באותו סוג של חומר). נמקו את תשובתכם !

3. הסבירו מדוע בקיץ, בשעות הצהרים, החול שעל שפת הים חם יותר מהמים. האם המצב יישאר כך גם בשעות הערב? הסבירו!

4. החום הסגולי של מים גדול מהחום הסגולי של חומרים אחרים. אילו תופעות אקלימיות מסבירה עובדה זו ?

5. באילו דרכים ניתן להשיג שינוי באנרגיה הפנימית ?

6. לשני גופים, העשויים מאותו חומר, מסה שונה. האם ניתן לגרום לכך, שלשני הגופים תהיה אותה עליית טמפרטורה? נמקו את תשובתכם!

7. מספקים כמות חום זהה לשני גופים, העשויים מאותו חומר. ציינו באילו תנאים:
   א. תיגרם לשני הגופים אותה עלייה בטמפרטורה.
   ב. תיגרם לאחד מהגופים עלייה פי 2 גדולה יותר בטמפרטורה.

8. לתוך כוס תה מכניסים שתי כפיות, האחת מאלומיניום והשנייה מכסף (מסת הכפיות זהה).
   א. איזו כפית תהיה חמה יותר ?
   ב. איזו כפית תתקרר מהר יותר, כאשר נוציא אותן מהכוס ?

9. בהסקה מרכזית מקובל להשתמש במים ולא בנוזל אחר. מהי הסיבה לכך?

10. ציין אמצעים בהן הינך מווסת את הטמפרטורה:
   א. של גופך. ב. של סביבתך.

11. מה תענו לשאלה: " כמה חום יש בתוך כוס קפה חם " ? נמקו!

12. האם קיים "חוק שימור החום" נמקו!



שאלות חישוב

(את ערכי החום הסגולי של החומרים הוציאו מהטבלה).

1) מהי כמות החום, שיש לספק ל- 10 ק"ג מים, על מנת שהטמפרטורה שלהם תעלה מ- 20° צלסיוס ל-35° צלסיוס?

2) לגוף עשוי נחושת, שמסתו 0.5 ק"ג, נוספה אנרגיה פנימית של 800 ג'ול. בכמה עלתה הטמפרטורה בגוף?

3) 300 גרם מים מחוממים בסיר אלומיניום, שמסתו 150 גרם. מהי כמות החום, שסופקה **למים ולסיר**, אם הטמפרטורה שלהם עלתה מ- 25° צלסיוס ל-30° צלסיוס?

4) כאשר הוסיפו לגוף, העשוי מחומרים בלתי ידועים, כמות חום של 1000 גו'ל, עלתה הטמפרטורה שלו ב- 50 צלסיוס. מה קיבול החום של הגוף?

5) הטמפרטורה של 200 גרם תה בכוס ירדה עד ל- 20^0 צלסיוס, ועקב כך קלט האוויר שבחדר כמות חום של 33,600 ג'ול. מה הייתה הטמפרטורה ההתחלתית של התה?

6) כדור ברזל, שמסתו 5 ק"ג, נופל מגובה של 500 מטר. בהגיעו ארצה מהירותו היא $80 \frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}}$. חשב בכמה מעלות עלתה טמפרטורת הכדור עקב החיכוך עם האוויר. (הניחו שאין מעבר חום מהגוף לסביבה).

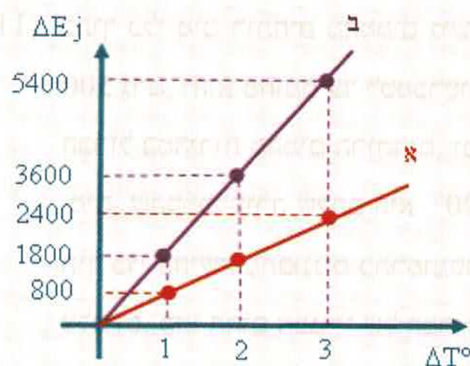
7) מערבבים 400 גרם מים, שהטמפרטורה שלהם 25° צלסיוס, עם 500 גרם מים, שהטמפרטורה שלהם 10° צלסיוס. מה תהיה טמפרטורת התערובת?

8) לתוך אמבט מים מסוים ניתן להכניס 150 ליטר. ממלאים את האמבט באמצעות שני ברזים: ברז מים קרים, שהטמפרטורה שלהם 20° צלסיוס, וברז מים חמים, שהטמפרטורה שלהם 60° צלסיוס. איזו כמות מים יש להזרים מכל ברז, אם מעוניינים שטמפרטורת המים תהיה 35° צלסיוס?

9) מחממים שני גופים העשויים מחומרים שונים, שמסת כל אחד מהם 2 ק"ג. הגרף הבא מתאר את כמות החום, שקלטו הגופים, כפונקציה של שינוי הטמפרטורה שלהם.

א. מצאו את החום הסגולי של כל אחד מהגופים.

ב. מצאו מאיזה חומר עשויים הגופים (היעזרו בטבלת החום הסגולי).



10) גליל, שמסתו 10 גרם, עשוי מחומר מסוים. גליל מחומם באמצעות סלסלה עם משקולות, שמשוחררת כל מהלך הניסוי מגובה של 1 מטר. את משקל הסלסילה והמשקולות שבתוכה משנים כל פעם; תוצאות הניסוי נרשמו בטבלה.

א. שרטטו גרף של השינוי באנרגיה הפנימית, הנגרמת לגוף (ציר אנכי), בתלות בשינוי הטמפרטורה (ציר אופקי).

ב. חשבו את ערכו של שיפוע הגרף. איזה גודל פיסיקלי הוא מייצג?

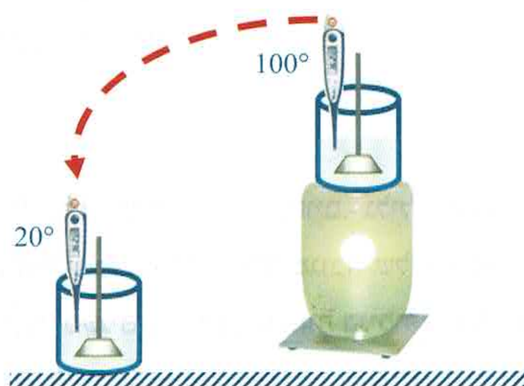
ג. מצאו מהגרף את החום הסגולי של הגוף, וזהו, מאיזה חומר הוא עשוי.

ΔT^0 צלסיוס	G ניוטון
2.3	9
3	12
3.85	15
4.6	18
5.35	21



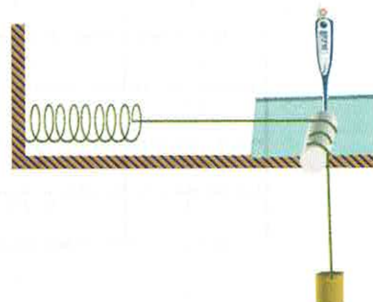
11) בתוך כלי מים רותחים מחממים גוש ברזל (שמצויד בידית). מסתו של הגוש היא 500 גרם, והוא מחומם עד לטמפרטורה של 100° צלסיוס. אחר כך מוציאים את הברזל במהירות מהמים הרותחים, ומכניסים אותו לתוך כוס, שמכילה 500 גרם מים, שהטמפרטורה שלהם היא 20° צלסיוס (תרשים).

תוך כדי בחישה מתבוננים בתרמומטר. הטמפרטורה הסופית המתקבלת היא 28° צלסיוס. מהו החום הסגולי של הברזל, כפי שהתקבל בניסוי?



12) לקצה חופשי של קפיץ, שקבוע כוח שלו הוא $k = 100\ \frac{\text{ניוטון}}{\text{מטר}}$, קושרים חוט ניילון וכורכים אותו סביב גליל אלומיניום, שמסתו 10 גרם. את קצהו השני של חוט הניילון מחברים למשקולת, שמסתה קטנה מאד. (תרשים).

ΔL מטר	ΔT° צלסיוס
0.2	0.22
0.3	0.49
0.4	0.88
0.5	1.37



כל פעם משנים את מידת התארכות הקפיץ, ובודקים את עליית הטמפרטורה, הנגרמת לגליל האלומיניום, לאחר שהחוט התחכך סביבו. הטבלה מסכמת את התוצאות שנתקבלו.

א. שרטטו גרף של $\Delta T°$ בתלות ב- ΔL^2.

למה שווה שיפוע הגרף? (בטאו בפרמטרים).

ב. חשבו את החום הסגולי שהתקבל בניסוי, והשוו לזה שבטבלה.

(הדרכה: חשבו תחילה את שיפוע הגרף, ואחר כך חלצו את C).

תשובות

1) 630,000 ג'ול. **2)** °4 צלסיוס.

3) 6982.5 ג'ול. **4)** $200\ \frac{J}{°C}$.

5) °60 צלסיוס. **6)** °3.83 צלסיוס. **7)** °16.66 צלסיוס.

8) 56.25 ק"ג מים חמים, 93.75 ק"ג מים קרים.

9) א. $400\ \frac{J}{kg \cdot° C}$, $900\ \frac{J}{kg \cdot° C}$.

ב. גוף א' עשוי נחושת, גוף ב' עשוי אלומיניום.

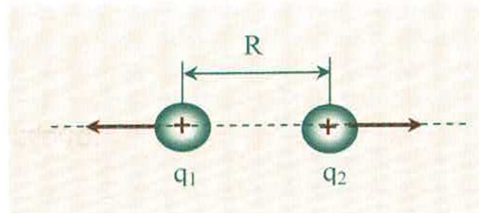
10) ב. שיפוע הגרף מייצג את קיבול החום. $H = 3.927\ \frac{J}{°C}$ ג. $392\ \frac{J}{kg \cdot° C}$

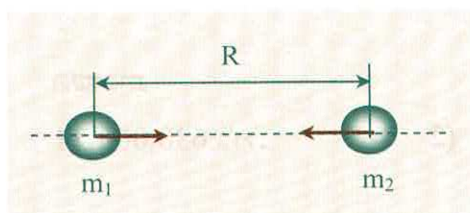
החומר הוא פליז.

11) $466.66\ \frac{J}{kg \cdot° C}$ **12)** א. k/2mc ב. $909\ \frac{J}{kg \cdot° C}$

פרק כ' - אנרגיה פוטנציאלית חשמלית

כאמור, **אנרגיה** היא אפיון מצב של גוף, או של מערכת גופים, אשר נקבע על ידי יחסי הגומלין בין הגופים או על ידי **אינטראקציה**. אפיינו את האינטראקציה עלי ידי סוגים שונים של **כוח**, לכן קיימת הקבלה בין סוגי האנרגיה וסוגי הכוח בין הגופים. בפרק ז' תיארנו תופעות שנגרמות עקב אינטראקציה מסוג מסוים הקשורה לקיום מטען חשמלי – אינטראקציה חשמלית. אינטראקציה זו מאופיינת על ידי **הכוח החשמלי**. לכוח זה דמיון רב לכוח הכבידה.





הדמיון העיקרי מתבטא בתקיפות של חוק הכוח, שדומה במבנה לחוק המשיכה העולמי של ניוטון. זהו חוק קולון:

חוק קולון

$$F^{electric} = k_e \frac{q_1 q_2}{R^2}$$

חוק ניוטון

$$F^{grav} = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

סוג זה של כוח הוא כוח מרכזי, והתלות שלו במרחק בין המרכזים, שצורתה $\frac{1}{R^2}$, מבטיחה שהכוח יהיה **כוח משמר** - פוטנציאלי. כלומר, עבודת הכוח, המתבצעת בהעברת מטען מנקודה 1 לנקודה 2, אינה תלויה בצורת המסלול ביניהם, אלא רק **במיקום היחסי של המטענים**. כפי שדיברנו בהקשר לכוח הכבידה, תכונה זו מאפשרת לאפיין נקודות במרחב סביב מרכזי הכוח (המסות או המטענים החשמליים) מבחינת העבודה, המתבצעת במעברים ביניהם. אפיון זה הוא האנרגיה הפוטנציאלית. לכן, בדיוק כמו שהגדרנו אנרגיה פוטנציאלית של כבידה, ניתן להגדיר **אנרגיה פוטנציאלית חשמלית**.

כידוע, בניגוד לכוח הכבידה, מטענים חשמליים יכולים להיות משני סוגים ובהתאם הם יכולים לדחות (מטענים מסוג זהה) או למשוך (מטענים מסוגים שונים) זה את זה. בהקשר

לעבודה של הכוח החשמלי, מצב זה מתבטא בסימן העבודה המתבצעת: חיובית (תנועת המטען בכיוון הכוח) או שלילית (תנועת המטען בכיוון מנוגד לכיוון פעולת הכוח).

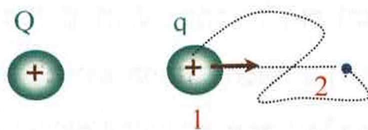
נתבונן בשני מטענים חיוביים, המוחזקים במרחק R, כמו בתרשים. ברגע, שנשחרר אותם, הם ינועו לכיוונים מנוגדים הודות לדחייה ביניהם. המצב דומה למצב, בו מסה m נמצאת בגובה מסוים מעל פני כדור-הארץ, אם כי מדובר במשיכה לעומת הדחייה. ניתן לתאר את התהליך במונחים של עבודה-אנרגיה.

במשיכת כבידה, לאחר שחרור הגוף בוצעה עבודה של כוח הכובד. הגוף הואץ, כלומר, גדלה האנרגיה הקינטית שלו, וניתן לפרש זאת כהקטנה של האנרגיה פוטנציאלית שלו יחסית לארץ:

$$\Delta E^{pot}_{grav} \downarrow \Leftarrow W_{grav} \uparrow \Rightarrow \Delta E_{kin} \uparrow$$

באופן דומה נטפל במקרה של מטענים חשמליים. ביצוע עבודה חיובית של כוח חשמלי נוכל לפרש כהקטנה של האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית המלווה בהגדלה של האנרגיה הקינטית של המטענים.

$$\Delta E^{pot}_{electric} \downarrow \Leftarrow W_{electric} \uparrow \Rightarrow \Delta E_{kin} \uparrow$$



עתה, על מנת לפשט את הטיפול נגרום למטען Q להישאר במקום. לאחר שחרור של מטען שני (q) מנקודה 1 לעבר נקודה 2, תתבצע עבודת הכוח החשמלי, ותגדל האנרגיה הקינטית של המטען. לאור **האופי הפוטנציאלי** של הכוח החשמלי, תהיה עבודה זו תלויה בגודל המטען q ובמקומות של הנקודות 1 ו- 2 בלבד. תלות זו ניתן להציג כמכפלה של שני גורמים, q ו-U_{12}:

$$W_{electric} = q \cdot U_{12}$$

כאמור, הגורם - U_{12} מבטא את התלות של עבודת הכוח החשמלי בבחירת הנקודות 1 ו-2. גורם זה מכונה **הפרש פוטנציאלים** בין הנקודות 1 ו-2, או **מתח חשמלי** בין נקודות אלו. לפי הגדרה זו הביטוי עבור המתח הוא:

$$U_{12} = \frac{W_{electric}}{q}$$

במילים אחרות:

המתח החשמלי בין נקודה 1 ו- 2 הוא העבודה, המתבצעת בהעברת יחידת מטען חיובי בין הנקודות.

לעיתים מכנים את הפרש הפוטנציאלים כ"עבודה סגולית". על סמך הגדרה זו נגיע לביטוי עבור האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מערכת מטענים. כפי שראינו, השינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית מוגדר כך, שיחד עם השינוי באנרגיה הקינטית, נשמרת האנרגיה הכללית של המטען, כשלא פועלִים כוחות אחרים. כלומר, הגדלת האנרגיה הקינטית של המטען גורמת להקטנת האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שלו:

$$-\Delta E_{electric}^{pot} = \Delta E_{kin}$$

או:

$$\Delta E_{pot}^{electric} = -W_{electric}$$

יחד עם הביטוי הקודם מקבלים:

$$-\Delta E_{pot}^{electric} = \Delta E_{kin} = W_{electric} = U_{12} \cdot q$$


אלסנדרו וולטה
1827 - 1745

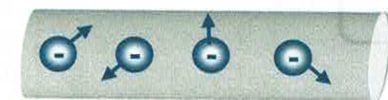
כידוע, נמדדת העבודה ביחידות ג'ול, והמטען החשמלי – ביחידות קולון. על סמך כל זאת והגדרת המתח החשמלי נקבל יחידה למדידת המתח. המתח בין שתי נקודות הוא **אחד וולט**, אם מתבצעת עבודה של **אחד ג'ול** בהעברת מטען חיובי של **אחד קולון** בין הנקודות:

1 וולט · 1 קולון = 1 ג'ול

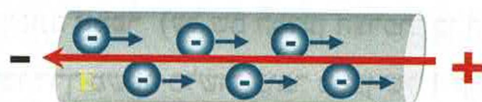
הזרם החשמלי

מהמגוון האדיר של החומרים השונים, למתכות חשיבות מיוחדת במעגלים חשמליים, זאת בעקבות המבנה האטומי המיוחד שלהם. התכונה המיוחדת של המתכות היא, שהשריג האטומי של גוף המתכת מורכב מאטומים, בהם חסרים אלקטרונים חיצוניים. אטומים אלה הפכו להיות טעונים במטען חשמלי חיובי (בגלל חוסר באלקטרונים), והם מכונים יונים. בתוך השריג נמצאים אלקטרונים, אשר עזבו את איטומיהם המקוריים, והפכו להיות גז אלקטרוני. בסך הכול המתכת נשארת נטולת מטען חשמלי.

לאלקטרונים של הגז יש יכולת לנוע, כאשר מופיעים מטענים אחרים, או כפי שנהוג להתבטא, מופיע שדה חשמלי נוסף בתוך המתכת. לפעמים מכנים גז אלקטרונים זה בשם "**אלקטרוני הולכה**", או "**אלקטרונים חופשיים**", אלא שצריך להבין את גבולות חופש זה. בתנאים רגילים, אלקטרוני ההולכה יכולים לנוע בתוך המתכת, אך לא לעזוב אותה. תנועה זו נעשית בכיוונים אקראיים, כלומר, בכל הכיוונים, ללא העדפה של כיוון כלשהו, ממש כמו שנעים האטומים בתוך גז בעל טמפרטורה.



תנועה חופשית של אלקטרוני הולכה



תנועה מסודרת של אלקטרוני הולכה

המצב משתנה לחלוטין, כאשר בקצהו האחד של חוט מתכתי ניצור הצטברות של מטען חשמלי (אלקטרונים). במצב זה, ובעקבות הדחייה הקיימת בין האלקטרונים, חלק מהם ייכנסו לתוך החוט ויטעינו אותו לכל אורכו, כשהם מצטברים בשכבה החיצונית של החוט, ויוצרים סוג של שרוול מטען לכל אורכו, בצפיפות המשתנה ממקום למקום. בעקבות ההשפעה של שרוול מטען זה על אלקטרוני ההולכה בתוך המתכת, נוצרת זרימה של אלקטרוני הולכה לאורך החוט. תנועה משותפת ומכוונת זו של האלקטרונים מכונה זרם חשמלי.

זרם חשמלי הוא תנועה משותפת בכיוון מסוים
של חלקיקים הטעונים במטען חשמלי

אין זו חובה, כמובן, שזרם חשמלי יהיה זרם של אלקטרונים (גם זרם של חלקיקים טעונים חיובית ייתכן), אך במתכת רק אלקטרוני ההולכה הם הזמינים ליצירת זרם חשמלי. כלומר, המתכות מהוות **מוליכות** זרם של אלקטרונים. תמיסות של חומרים שונים, כמו חומצות ומלחים, יכולות גם הן להיות מוליכות של זרם יונים, וקיימים גם חומרים, שאינם כוללים מטענים, הזמינים לתנועה משותפת. אלה הם **המבודדים**.

הגיוני לאפיין זרם חשמלי דרך משטח מסוים על ידי קצב מעבר המטען דרך משטח זה, או באופן מתמטי. **עוצמת הזרם** היא:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$


אנדרה-מרי אמפר
1836 - 1775

כאן Δq היא כמות המטען שעובר, Δt פרק זמן המעבר ו- I – מסמל את הזרם החשמלי. כתמיד, ניתן להגדיר את יחידת הזרם המכונה **אמפר** (על שם המדען הצרפתי בן המאה ה- 19) כזרם שבו דרך משטח כלשהו עובר מטען של 1 קולון במשך פרק זמן של שנייה אחת:

$$1A = \frac{1c}{1\sec}$$

ברור שזרם חשמלי יכול לשקף תנועה משותפת הן של מטענים חיוביים והן של מטענים שליליים. כדי לשמור על אחידות התיאור, וכדי להיות מסוגלים לתאר גודל מטען שמועבר ממקום למקום על ידי שני סוגי המטען בו זמנית, יש להגדיר את כיוון הזרם ככיוון התנועה של מטענים חיוביים. כלומר, תנועה משותפת של אלקטרונים מנקודה 1 לנקודה 2 מייצג זרם מנקודה 2 לנקודה 1:



כדי להבין את ההיגיון בהגדרה זו ניקח לדוגמה מקרה של הזזת גוש מתכת כולו ממקום למקום. הזרם שנוצר בתנועה זו על ידי היונים החיוביים בדיוק מבטל על הזרם ההפוך של האלקטרונים. זוהי תוצאה רצויה, שהרי לא מועבר שום מטען ממקום למקום.



נוצר מצב מוזר, בו אנו רושמים כיוון לזרם במתכות, שהוא בעצם הפוך לכיוון תנועת המטען החשמלי שבתוך המתכת, חוטי החשמל. זה קורה, משום שבמתכות הזרם מתקיים על ידי האלקטרונים, הטעונים שלילית.



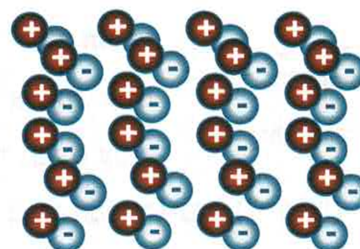
סימון מקור מתח

כאמור, אחד התנאים ליצירת זרם חשמלי הוא קיום **הפרש פוטנציאלים** בין קצותיו של המוליך, או במילים אחרות, קיום שדה חשמלי בתוך המוליך. מצב זה זהה להפרשי גבהים עבור גופים שליד כדור הארץ. אם ניצור שדה חשמלי בתוך המוליך, ינועו ("ייפלו") המטענים החשמליים בתוך המוליך. תנועה זו תתקיים כל עוד אנו נדאג לקיום הפרשי פוטנציאל לאורך המוליך. ברגע שיושג איזון בין המטענים, תיפסק תנועת המטענים. לצורך תמיכה לאורך זמן בזרם, משתמשים במכשיר מיוחד – **מקור מתח חשמלי**. תפקידו ליצור הפרש פוטנציאלים (הפרש גבהים) בין קצותיו של המוליך ובין כל שתי נקודות לאורך המעגל החשמלי. תוך כדי פעולה זו יוצאים אלקטרונים מן המקור, ונקלטים על ידיו.

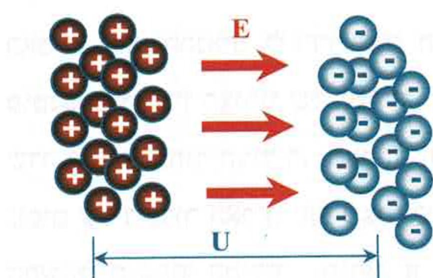
כאמור, במצב ללא מקור המוליכים במעגל הם ניטראליים, והתפלגות המטען לאורכו **אחידה**. ברגע, שנחבר מוליך למקור חשמלי, ייוצר הפרש פוטנציאלים בין קצות המוליך, **תופר האחידות** בהתפלגות המטען לאורך התיל, ותחל תנועה של מטענים. המקור החשמלי שומר על הפרש הפוטנציאלים בין קצותיו של המוליך, שבו זורם הזרם.

באופן כללי ניתן להגיד, שמקור מתח הוא מתקן, שממיר אנרגיה מסוג כלשהו לאנרגיה חשמלית של מטענים. אך מה עומד מאחורי הכרזה כללית זאת?

ללא קשר לסוג המקור המתחבר, במקור מתרחשת הפרדה של מטענים חשמליים, שכתוצאה ממנה נוצר ריכוז של מטענים מכל סוג על שני **ההדקים** של המקור: האלקטרונים מצטברים בהדק השלילי, ובהדק החיובי נוצר חוסר באלקטרונים. ברור, שמצב זה כרוך באנרגיה פוטנציאלית גבוהה בהרבה מזו שבהתפלגות אחידה של המטענים (כך למשל, למערכת המטענים במצב א' אנרגיה פוטנציאלית חשמלית קטנה בהרבה מאשר לאותה מערכת במצב ב'). זו בדיוק התוצאה של הפרדת מטענים, ולכך דרושה השקעת אנרגיה ממקור אחר. בתחנות כוח פועלים מנועי חום למיניהם, מים נופלים, רוח נושבת, ושמש קורנת. כל הסידורים האלה משלבים את הטבע במידה שונה. במעבדת מבוא אנו משתמשים במקור מסוג נוסף: מקור כימי שמכונה **בטרייה**.



א' מערכת מטענים חשמליים לפני הפרדה – המצב כמו בקפיץ רפוי



ב' מערכת מטענים חשמליים לאחר הפרדה – המצב כמו בקפיץ מתוח

בתוך הבטרייה מתרחשת תגובה כימית בין חומרים מסוימים. כתוצאה מתגובה זו החומרים, שנבחרו, הופכים לחומרים אחרים. לאטומי כל חומר וצירופיהם ישנו סידור מסוים של אלקטרונים, והוא קובע את האנרגיה החשמלית הפנימית של האלקטרונים. בבטרייה בוחרים בתגובות כימיות כאלה, שמשנות את סידורי האטומים באופן כזה, שלחומרים שלאחר התגובה אנרגיה פוטנציאלית פנימית של אלקטרונים נמוכה יותר מזו שהייתה בהתחלה. כתוצאה מהפרש זה נגרמת הצטופפות של אלקטרונים בהדק אחד ודילול בהדק שני. זהו עיקרון הפעולה של המקורות הכימיים, כך שניתן לסכם:

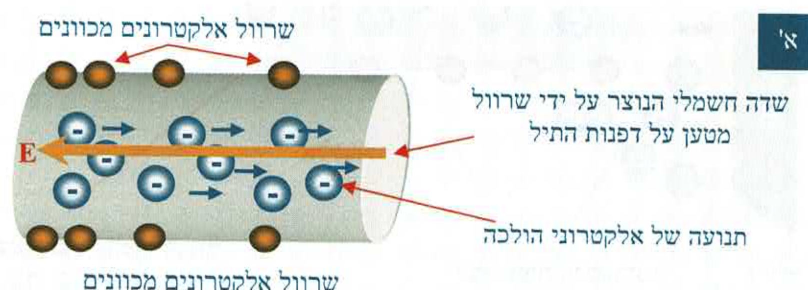


האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית הפנימית של האלקטרונים שבתוך החומר (אנרגיה חשמלית מיקרו) מומרת בתוך "מקור מתח כימי" (בטרייה או מצבר) לאנרגיה של אלקטרונים, שמצטופפים בהדק אחד של המקור, ומדוללים בהדק השני של המקור(אנרגיה חשמלית מאקרו).

ומה קורה בחוטים שמעבירים זרם?

כידוע, זרם חשמלי עובר דרך חוטים העשויים ממוליך מתכתי. נשאלת השאלה מה מתרחש שם, האם זרם חשמלי דומה לזרם מים? אם כן, מה משמש כדפנות הצינורות? תופעת הזרם החשמלי אינה פשוטה כלל וכלל, אך ניתן לדעת עליה. ידע זה ייבנה בשלבים.

כאמור, חוטי מתכת כוללים גז אלקטרוני, שניתן להניע אותו על ידי שדה חשמלי. שדה זה נוצר עקב הופעת אלקטרונים נוספים, שמקורם הוא הבטרייה (במובן זה הבטרייה מספקת אלקטרונים!). לאחר סגירת המעגל, מתפשטים אלקטרונים מן המקור, ויוצרים שרוול מטען על פני החוטים. לעומת האלקטרונים בתוך החוטים הנמצאים בצפיפות אחידה לאורך החוט, אלקטרוני השרוול משתנים בצפיפותם לאורך החוט. התפלגות מטעני השרוול היא כזו, שדוחפת קדימה (באמצעות השדה, כמובן) את אלקטרוני ההולכה שבתוך החוטים (תרשים א').



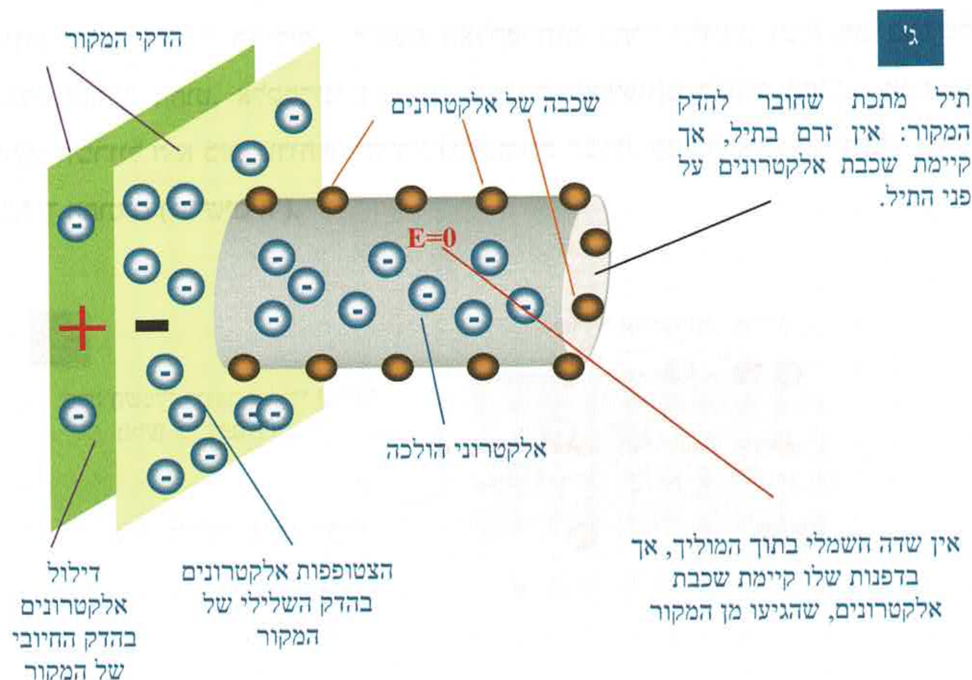
שרוול המטענים שבדפנות החוטים לא רק דוחף את האלקטרונים קדימה, אלא גם מכוון אותם, הרי התיל תמיד כולל פיתולים ולולאות! איך יודעים אלקטרוני ההוֹלכה על הצורך לפנות או לחזור אחורה, יחד עם התיל, כמובן?



בסיבוב התיל מצטברים על הדופן החיצוני שלו יותר מטענים מאשר בדופן הפנימי, וכך מתרחשת "הנהיגה" של הציבור האלקטרוני בתוך המתכת עצמה (תרשים ב').

נציין, ששרוול המטען נוצר מיד לאחר חיבור התיל עם הדק המקור, ואינו מחכה לסגירת המעגל. ההבדל בין המצבים של מעגל סגור לעומת מעגל פתוח הוא בכך, שבמעגל סגור הצפיפות של המטען בשרוול משתנה לאורך התיל, ויוצרת שדה בכיוון התנועה המשותפת של האלקטרונים. במעגל פתוח, מיד לאחר חיבור התיל אל המקור,

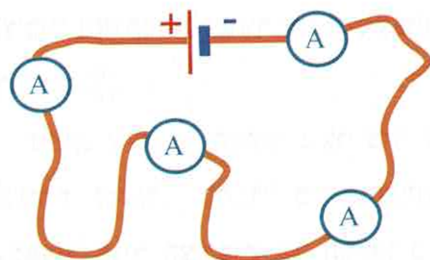
נוצרת התפלגות אחידה של מטעני השרוול (תרשים ג'). בכל מקרה כל קטע תיל המחובר להדק של המקור אינו עוד אלקטרו ניטראלי.



התהליכים, המתרחשים כאשר נוצרת התפלגות של שכבת אלקטרונים חיצוניים, מכונים **תהליכי מעבר**, או **תהליכים חולפים**. אנו לא נתמקד בהם, ולא נדבר עליהם בכל פעם, אך חשוב לדעת, שהם מתרחשים וקודמים לכל שינוי מצב בתוך המעגל החשמלי. אנו נדון כאן אך ורק במצבים שלאחר ההתייצבות: **מצבים עמידים**.

כיצד מומרת האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מקור?

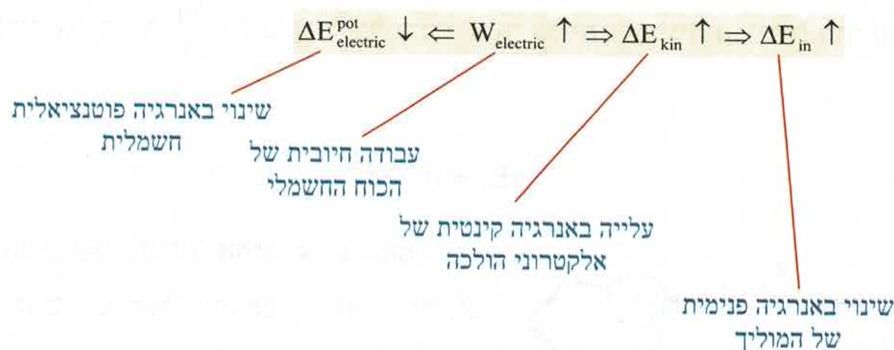
נבדוק עתה, באיזה תהליך פיזיקאלי מומרת אנרגיה פוטנציאלית חשמלית של המטענים, שהופרדו בתוך מקור המתח. לשם כך נחבר מוליך בין שני הדקיה של בטרייה. במעגל הנוצר נכלול מספר מדי זרם (ראו תרשים).



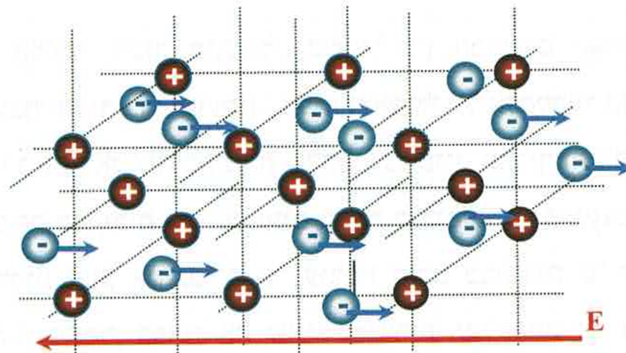
חיבור, המוליך להדקי המקור, גורם לכך שעל פני המוליך נוצרו המטענים בצפיפות

משתנה לאורך המעגל. הכוח החשמלי, שפועל בין המטענים האלה לבין אלקטרוני ההולכה, יבצע עבודה תוך כדי תנועתם. הכוח החשמלי על אלקטרוני ההולכה יאיץ אותם, כלומר, הם יגבירו את האנרגיה הקינטית שלהם. על פניו, תהליך זה צריך לגרום להגברת הזרם, שהרי הגדלת המהירות של המטענים חייבת לגרום להגדלת הקצב של מעבר המטען דרך התיל. למרות זאת, אם נבדוק את עוצמת הזרם במקומות שונים לפי מדי הזרם, נמצא, שהיא זהה. כלומר, בפועל אין שינוי במהירות האלקטרונים, ואת שימור מספרם לאורך המוליך אנו מניחים כמובן מאליו.

כיצד זה יתכן שהזרם נשמר? הפיתרון לבעיה זו הוא בכך, שיש להניח קיום **אפיק נוסף** להמרת האנרגיה, תהליך פיזיקאלי אשר דילגנו עליו. אפיק זה הוא תנועות (או תנודות) **מיקרו** של אטומי שריג המתכת. במילים אחרות, התנגשויות אלקטרוני ההולכה עם אטומי המתכת גורמות לעליה **באנרגיה הפנימית** של החומר המוליך. ניתן להיוודע לכך בקלות. אם ניגע במוליך, נחוש שהוא התחמם. עובדה זו מעידה על המרה של **אנרגיה פוטנציאלית חשמלית לאנרגיה פנימית של המוליך.** נתאר את כל התהליך באופן סימבולי:



ואיך מתרחש התהליך? כאמור, אלקטרוני ההולכה מואצים על ידי השדה החשמלי שבתוך התיל, הנוצר על ידי שרוול מטען על הדפנות. כל אלקטרון מואץ, עד שהוא נפגש עם אטום (יון) של השריג (ראה תרשים). בהתנגשות ביניהם מאבד האלקטרון חלק מהאנרגיה הקינטית שלו לטובת היון. היון אינו יכול לנוע, אך יכול ליצור תנודות סביב מצב שיווי המשקל. תנודות אלו הן מקור האנרגיה התרמית (אנרגיה פנימית) של השריג.

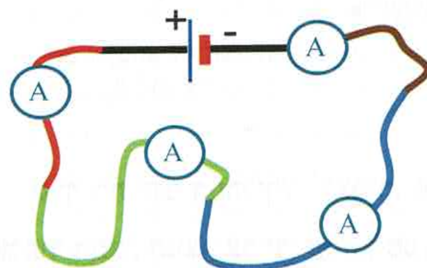


אלקטרוני ההולכה נעים דרך שריג היונים החיוביים ומתנגשים בהם

בעקבות התנגשויות עם יוני השריג תנועת האלקטרונים הופכת להיות מאוד לא אחידה: מואצת בהדרגה ונבלמת במהירות, אך למרות זאת בממוצע נשארים אלקטרוני הולכה בתנועה מסודרת נגד כיוון השדה של מטעני השרוול אם כי במהירות ממוצעת **נמוכה מאד**, כמילימטרים בשנייה.

עתה נבטא את השינוי באנרגיה הפנימית באופן כמותי. כאמור, מעבר מטען Δq בתוך שדה חשמלי בין נקודות עם הפרש פוטנציאלים U מלווה בעבודה: $W_{electric} = U \cdot \Delta q$. עבודה זאת הומרה לאנרגיה פנימית של המתכת $\Delta E_{in} = W_{electric}$. על סמך זאת והביטוי המגדיר את הזרם $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ ניתן לקבל ביטוי עבור עליית האנרגיה הפנימית תוך פרק זמן Δt:

$$\Delta E_{in} = U \cdot I \cdot \Delta t$$



השתמשנו במוליך **אחיד,** אך גם אם נבצע את הניסוי במעגל המורכב ממספר מוליכים שונים (בתרשים מוליכים שונים מצוירים בצבע שונה), נוודא, שעוצמת הזרם לאורך המעגל, ללא פיצולים, נשארת אחידה. זוהי תוצאה טבעית ודומה לשימור במקרה של זרם מים. היות ואלקטרוני ההולכה אינם נעלמים ואינם מצטופפים בשום מקום בתיל, חייב הזרם להישמר קבוע בגודלו לאורך כל המעגל. השוני בין המוליכים יהיה **במידת ההמרה** של האנרגיה החשמלית לאנרגיה הפנימית שלהם, בהתאם לשוני במבנה הפנימי של השריג בכל אחד מן המוליכים.

נוכחנו לדעת, שכתוצאה מהפרדת מטענים, המתרחשת במקור המתח ויצירת הפרש פוטנציאלים (מתח) בין הדקיו, נוצר זרם במעגל סגור. לכאורה, הודות להפרש הפוטנציאלים של המקור ועבודת הכוח החשמלי לאורך המוליך, המטענים היו חייבים לנוע בתאוצה ולגרום לזרם עולה במעגל. אולם, בניסויים התוודענו לכך, שעוצמת הזרם לאורך המוליך אינה משתנה. מכאן ניתן להסיק על קיומו של גורם, הבולם את תנועתם של המטענים, וקובע את תנועתם במהירות קובעה. גורם בלימה זה לתנועת המטענים במוליך מכונה **התנגדות חשמלית**.



הקשר בין המתח והזרם במעגל הוא **קשר סיבתי**: מפעילים מתח (U) – מקבלים זרם (I). הניסיון מראה, שבמקרים רבים (אלה המקרים הפשוטים ביותר) קשר זה הוא קשר ישר, כלומר ניתן לרשום עבורו: $I = \sigma \cdot U$

σ הוא מקדם הפרופורציה שבין המתח והזרם. המשמעות הפיזיקאלית של מקדם זה נובעת מצורת הקשר בין הגורמים בנוסחה: עם עליית המתח U , הזרם I יעלה יותר, אם הערך של σ יהיה גדול יותר. לכן טבעי לכנות את המקדם σ– **מקדם המוליכות** של המוליך, או בקיצור, **מוליכות**.

המושג ההפוך למוליכות, לפי המשמעות המילולית של המונח, הוא **התנגדות** [resistance]: עלייה של המוליכות שקולה לירידה בהתנגדות. לכן נהוג גם להגדיר את הקשר בין ההתנגדות למוליכות באופן הבא:

$$R = \frac{1}{\sigma}$$



גאורג אוהם
1878-1854

טבעי לסמן את ההתנגדות באות R. לאחר הגדרה זו הקשר הישר בין המתח לזרם, שטענו לקיומו על סמך הניסיון עם מוליכי מתכת, יראה כך:

$$I = \frac{U}{R}$$

קשר זה מכונה **חוק אוהם**, לכבוד המדען הגרמני בן המאה ה- 18, אשר חקר את הקשר בין הזרם לבין המתח.

הזרם דרך מוליך נמצא ביחס ישר למתח שבין קצותיו.

קשר זה קובע גם יחידת מדידה של התנגדות (אין יחידות מיוחדות עבור מוליכות).

אם הפרש פוטנציאלים של **1 וולט** גורם לזרם בגודל של **1 אמפר**, קובעים, שההתנגדות של מוליך זה שווה ל- **1 אוהם**.

$$\frac{1\text{ וולט}}{1\text{ אמפר}} = 1\text{ אום}$$

הקשר הישר בין מתח, זרם והתנגדות ניתן להציג בשלושה אופנים שקולים:

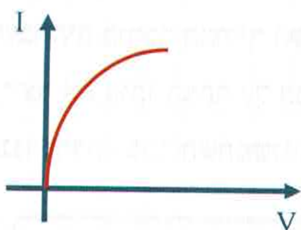
$$R = \frac{U}{I} \qquad I = \frac{U}{R} \qquad U = I \cdot R$$

למרות המשמעות הפיסיקלית הזהה, בוחרים בביטוי אשר במצב נתון הוא הנוח ביותר (נדגים בחירה זו בהמשך).

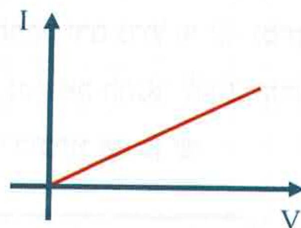

סימון נגד אומי

כאמור, חוק אוהם טוען לקשר ישר בין הזרם והמתח, אך בניסוי אמיתי קשה לשחזר תלות זו עקב התחממות המוליך המכניסה גורם נוסף לתמונה: התלות של ההתנגדות בטמפרטורה. תלות זאת קיימת, וטבעי שכך. בעליית הטמפרטורה של המוליך גוברות התנודות של אטומי השריג, ובעקבות כך עולה הפרעתם לתנועה השוטפת של אלקטרוני ההולכה. מסיבה זו היה קשה מאוד לאוהם לגלות את החוק, ובמציאות הוא מהווה רק קירוב למצב האמיתי. קירוב זה לפעמים טוב ולפעמים – לא. במקרה של תקיפות החוק, המצב מכונה "מצב אומי", או **"נגד אומי"** , עבור מוליך המראה תלות ישירה בין הזרם דרכו והמתח עליו.

כדוגמה של תלות אחרת בין זרם לבין מתח נוכל לקחת חוט להט של נורה חשמלית. על אף היותו מוליך מתכתי, נורה אינה מקיימת את חוק אום. עם החימום משתנה באופן משמעותי הקשר בין הזרם דרך עצם מסוים (רכיב במעגל) לבין המתח בין קצותיו. מקובל להציג קשר זה באמצעות גרף המכונה: **אופיין** (ראו תרשימים).



אופיין של רכיב לא אומי (נורת להט)

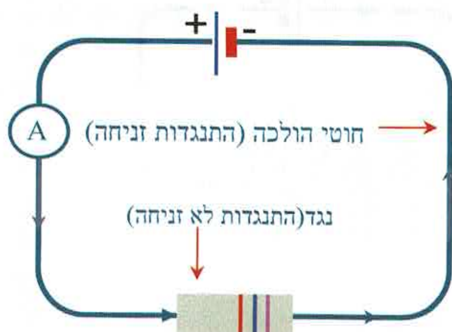


אופיין של רכיב אומי (נגד)

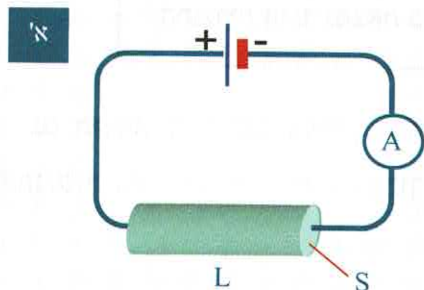
הניסיון מראה, שגם אם נתעלם מהתלות של ההתנגדות בטמפרטורה, לא נקבל קשר ישר בין המתח לבין הזרם עבור מוליכים רבים. אלה הם חומרים שאינם מתכות, למשל, גז, נוזל, מוליכים למחצה. עבור כל אלה חוק אוהם בדרך כלל אינו תקף.

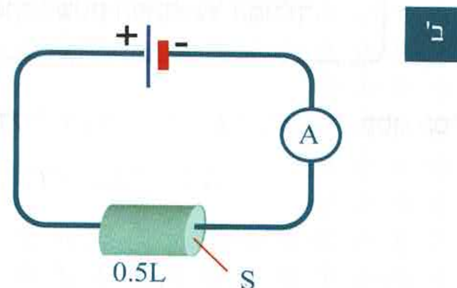
במה תלויה התנגדותו של מוליך מתכתי ?

את הנגדים מייצרים מחומרים מוליכים, שהתנגדותם גבוהה בהרבה מזו של המתכות של חוטי המעגל. במעגל החשמלי במעבדה ניתן להזניח את התנגדות החוטים. נבדוק עתה את השפעת שטח החתך של המוליך (S) ואורך המוליך (L) על גודל התנגדות.



I. ניקח שני מוליכי נחושת בעלי אותו שטח חתך, כאשר אחד מהם ארוך פי 2 מהשני (עיינו בתרשימים א' ו- ב'). נחבר כל אחד מהם למקור מתח (המקורות זהים ביניהם), ונקרא את קריאת מד הזרם A.



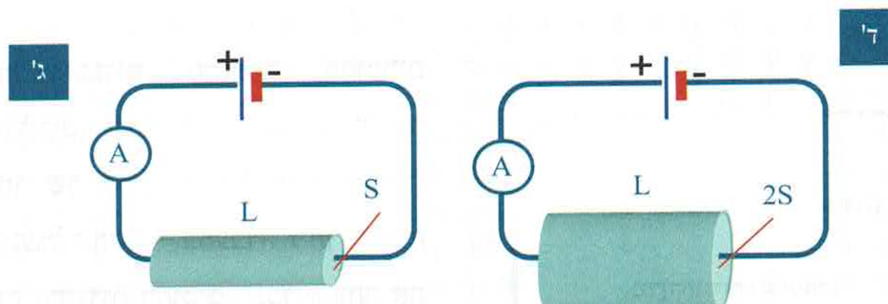


במעגל, שבו היה מורכב המוליך הקצר פי 2, מתקבל זרם גדול פי 2. נסיק מכך, שאם מקור המתח יוצר את אותו המתח על הנגד (בהמשך נבין את התנאי לכך), הזרם גדל, מפני שהתנגדות הנגד ירדה. בכך השתמשנו בחוק אוהם. קיבלנו אם כן ש:

התנגדות הנגד נמצאת ביחס ישר לאורך המוליך.

תוצאה זו הייתה צפויה, שכן הגדלת אורך המוליך מעלה את הסיכוי להתנגשויות של אלקטרוני ההולכה עם אטומי השריג שבתוך המוליך בדיוק באותו יחס.

II. ניקח עתה שני מוליכי נחושת בעלי אורך זהה, אך שטח חתך שונה: האחד בעל שטח חתך כפול מהשני (תרשימים ג' ו-ד'). נרכיב שוב מעגלים בעלי מקורות מתח זהים, ונחזור על מדידות הזרם:



במעגל, בו היה מורכב המוליך בעל שטח החתך הכפול, מד הזרם מראה קריאה גדולה פי 2. על פי חוק אום נסיק על ירידת התנגדות פי 2. כלומר: הכפלת שטח החתך גורמת להקטנת ההתנגדות בהתאמה.

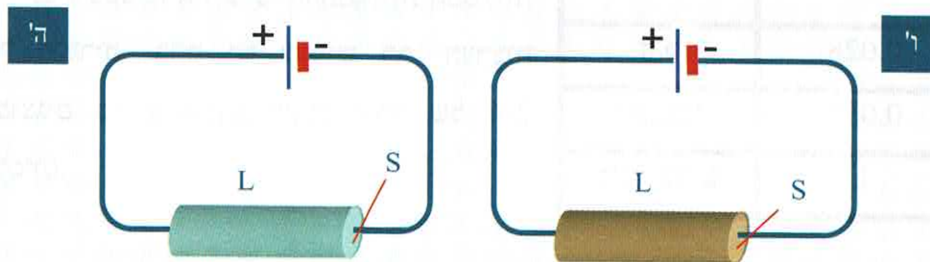
התנגדות הנגד נמצאת ביחס הפוך לשטח החתך של המוליך.

גם תוצאה זו הייתה צפויה, שהרי בהגדלת שטח החתך של המוליך קטן הסיכוי להתנגשות של אלקטרוני ההולכה בתוך המוליך בדיוק באותו יחס.

III. עתה ניקח שני מוליכים, העשויים מחומרים שונים, האחד מאלומיניום והשני מנחושת, לשניהם אותו אורך ואותו שטח חתך (תרשימים ה' ו-ו').

שוב נחבר אותם למקורות מתח זהים, ונראה קריאה שונה של עוצמת הזרם בכל מעגל. מכאן:

ההתנגדות תלויה בסוג החומר, ממנו עשוי הנגד.



תוצאה זו גם היא טבעית, שכן, שינוי בסוג החומר פירושו שינוי בגודל ובמטען של היונים שבשריג, וזה כמובן משפיע על התנגדות המוליך.

מאפיינים חומרים שונים מבחינת ההתנגדות על ידי הגודל של **התנגדות סגולית**. זוהי ההתנגדות של נגד, העשוי מחומר מסוים, כאשר הנגד הוא בעל אורך של יחידה אחת ושטח חתך של יחידה אחת מוסכמת.

התנגדות סגולית היא ההתנגדות של מוליך מסוים, העשוי מחומר מסוים,
כאשר הנגד הוא בעל אורך של יחידה אחת
ושטח חתך של יחידת אחת של שטח.

את ההתנגדות הסגולית מסמנים באות היוונית - ρ. ניתן לחבר את שלושת הגורמים, הקובעים את גודל ההתנגדות של המוליך, לתוך ביטוי אחד:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

נהוג למדוד את אורך המוליך ביחידות של מטר ואת שטח החתך שלו ביחידות מילימטר מרובע: ממ"ר, כי קוטר החוטים נמדד בדרך כלל במילימטרים. בחירה זו קובעת את היחידות של ההתנגדות הסגולית: $\frac{\text{ממ"ר} \cdot \text{אום}}{\text{מטר}}$.

נציג בטבלה את ערכי ההתנגדויות הסגוליות של חומרים, בהם יש שימוש רב. הערכים המוצגים בה מתאימים לטמפרטורה של 20° צלסיוס.

החומר המוליך	התנגדות סגולית $\left[\frac{\text{ממ"ר} \cdot \text{אום}}{\text{מטר}}\right]$
כסף	0.016
נחושת	0.018
אלומיניום	0.027
זהב	0.028
טונגסטן	0.055
ניקל-כרום	1



כאמור גורם נוסף, שבו תלויה התנגדותו של מוליך, היא **הטמפרטורה**. במתכות, למשל, ההתנגדות גדלה עם עליית הטמפרטורה, ואילו בתמיסות, במוליכים למחצה ובחומרי בידוד ההתנגדות יורדת, כאשר הטמפרטורה עולה.

מדידות במעגל חשמלי

למרות שאנו מנסים לבנות את הידע מהפשוט למורכב, לא תמיד ניתן לעשות זאת באופן מלא. כך לדוגמה המצב עם מכשירי מדידה במעגל החשמלי. אופן פעולת מכשירי המדידה מבוסס על ידע מתקדם בתורת האלקטרומגנטיות, שלא התייחסנו אליו כלל. משום כך, בהסבר שלנו על המעגל החשמלי אנו חייבים להתייחס אל מכשירי מדידה ללא הבנה של ממש, כ"קופסאות פלא" בעלות תכונות מיוחדות וכללי הפעלה, שצריך ללמוד אותם, אם רוצים למדוד בהצלחה. עם זאת, כדאי לזכור את השאלה כיצד עובדים מכשירי המדידה החשמליים, ולחזור אליה בהמשך הלימודים על חשמל.

א. מד זרם



סימון של מד זרם

למדידת עוצמת הזרם משתמשים במד זרם. למד זרם של זרם, שאינו משנה את כיוונו (זרם ישר), שני הדקים: חיובי (+) ושלילי (-). כדאי להבין, שמד הזרם מודד תמיד רק את הזרם, שיזרום דרכו, ולא שום זרם אחר. לכן מחברים מד זרם במעגל כך, שדרכו יזרום בדיוק הזרם שמעניין למדוד אותו, בשמירה על הכיוון המוסכם של זרם חשמלי: מההדק החיובי שלו אל ההדק השלילי.



אופן חיבורו של מד זרם במעגל חשמלי כאשר מודדים זרם כללי במעגל פשוט

לאחר חיבור מד זרם למעגל חשמלי, הוא יהווה חלק מהמעגל, ויעיד על הזרם, שיעבור דרכו. כדי שהשפעת מד הזרם עצמו על המעגל החשמלי, בו הורכב, תהיה מינימאלית, מנסים לבחור במד זרם בעל התנגדות פנימית קטנה מאד לעומת התנגדויות יתר חלקי המעגל. רק במקרה זה נוכל להתעלם הנוכחות המכשיר במעגל. במצב זה מתייחסים למד הזרם כ"אידיאלי", כלומר, אינו משנה דבר עקב נוכחותו במעגל. ברור, שמד זרם אידיאלי במעגל אחד יכול להיות לא אידיאלי במעגל אחר.

ב. מד מתח



סימון של מד מתח

את הפרשי הפוטנציאלים (מתח) בין שתי נקודות במעגל חשמלי מודדים באמצעות מכשיר, המכונה "מד מתח". גם למד המתח שני הדקים, אותם מחברים אל שתי נקודות במעגל ביניהם, כשמעוניינים לדעת, מהו הפרש הפוטנציאלים ביניהן.



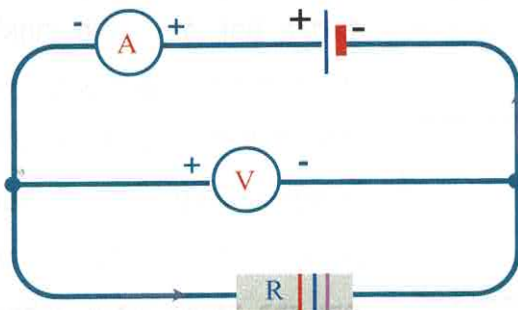
אופן חיבורו של מד מתח במעגל חשמלי על מנת למדוד מתח על הנגד

מד מתח הוא מכשיר, דרכו זורם זרם. על מנת שנוכל שלא להתייחס לקיומו של מד המתח במעגל ("מד מתח אידיאלי"), כלומר, שהשפעת מד המתח תהיה זניחה, יש לבחור מד מתח,

שהתנגדותו הפנימית גדולה בהרבה מהתנגדותם של יתר חלקי המעגל, עליהם מבקשים למדוד את המתח. במקרה זה קריאת מד המתח תעיד על המתח שהיה נמדד על הנגד גם ללא נוכחות מד המתח. בעצם הדרישה היא, שרק חלק קטן מהזרם הזורם דרך חלק המעגל, עליו מודדים את המתח, יתפצל. בהמשך, נוכל לדייק יותר לגבי הדרישות ממכשירי המדידה של הזרם ושל המתח.

מעגלים טוריים ומקבילים

ידיעת הקשר בין הזרם לבין המתח (חוק אוהם) מציידת אותנו ביכולת לחקור את המתרחש במעגל חשמלי פשוט, בו מחוברים נגדים אל המקור. במעגלים כאלה ייתכנו צירופים שונים של הנגדים. עם זאת, קיימות גישות כלליות בתיאור המעגל. כך למשל, תמיד ניתן למצוא **התנגדות שקולה** (R_{tot}) לצירוף נגדים כלשהו. נגד בעל התנגדות שקולה יכול להחליף צירוף של נגדים ולא לשנות את עוצמת הזרם, העובר דרך יתר המעגל.

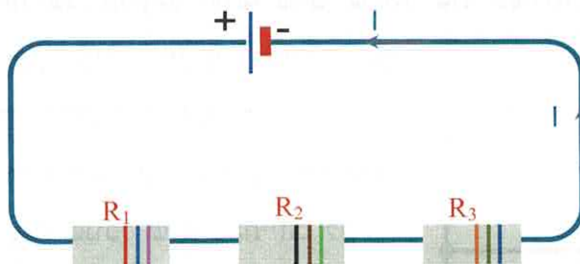


חיבורו של מד מתח ומד זרם במעגל חשמלי כדי למדוד זרם דרך הנגד ומתח עליו

נתחיל מייצוג של שני צירופי נגדים, שהם הבסיסיים בין המעגלים האפשריים של נגדים אומיים.

חיבור נגדים בטור

אופן החיבור של מספר נגדים בטור ברור מעצם המונח (ראה תרשים). חיבור זה כבר הכרנו והסברנו, על סמך שימור מספר האלקטרונים, שמשתתפים בזרם, מדוע בחיבור זה זורם דרך הנגדים **אותו זרם** בדיוק.



חיבור נגדים בטור

נרשום תכונה זאת: $I_{tot} = I_1 = I_2 = I_3 \quad (1)$

כאן I_3 ,I_2 ,I_1 מסמנים את הזרמים דרך הנגד המתאים, ו- I_{tot} מסמן את הזרם הכללי במעגל שבתרשים.

בחיבור טורי נשמר הזרם דרך הנגדים.

הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות, או המתח, מייצג עבודה, המתבצעת בהעברה יחידת מטען. ברור לכן ,שבחיבור טורי, עבודה זו היא סכום העבודות במעבר דרך כל נגד, בזה אחרי זה. לכן, גם עבור המתחים על הנגדים בחיבור זה ניתן לרשום:

$$U_{tot} = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2)$$

כאשר U_3 ,U_2 ,U_1 מסמנים את המתחים על הנגדים המתאימים, ו- U_{tot} מסמן את המתח על כל הנגדים ביחד.

בחיבור טורי סכום מפלי המתח על כל נגד שווה למתח הכללי על כל הנגדים יחד.

עתה בתוך ביטוי (2) עבור המתח הכללי נבטא את מפלי המתח על כל אחד מהנגדים בעזרת חוק אוהם. נקבל:

$$U_{tot} = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3$$

אם נשתמש גם בידע של (1) עבור הזרם במעגל, נקבל:

$$U_{tot} = I_{tot} \cdot (R_1 + R_2 + R_3)$$

ומכאן:

$$\frac{U_{tot}}{I_{tot}} = R_1 + R_2 + R_3$$

היחס $\frac{U_{tot}}{I_{tot}}$ מבטא את **ההתנגדות השקולה** של צירוף טורי של נגדים, כלומר:

$$R_{tot} = \frac{U_{tot}}{I_{tot}}$$

מכאן מקבלים עבור התנגדות שקולה של הנגדים R_{tot}:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3)$$

או, באופן כללי עבור n נגדים שונים המחוברים בטור:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n \qquad (3a)$$

בחיבור טורי התנגדות שקולה של הנגדים היא סכום ההתנגדויות שלהם.

ברור, שכאשר מדובר בנגדים זהים, מקבלים עבור ההתנגדות השקולה: $R_{tot} = n \cdot R$

חשוב לקבל את היחס בין מפלי המתח על שני נגדים, המחוברים בטור. הואיל ומפלי המתח על הנגדים הם לפי חוק אוהם $U_1 = I \cdot R_1$ ו- $U_2 = I \cdot R_2$, נקבל עבור היחס U_1/U_2

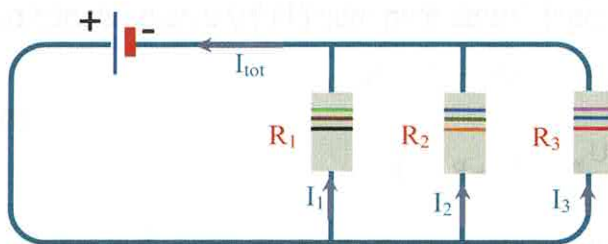
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \qquad (4)$$

בחיבור טורי יחס המתחים על הנגדים הוא
כמו יחס ההתנגדויות של הנגדים המתאימים.

כלומר, על הנגד שהתנגדותו גבוהה יותר ייפול יותר מתח. כאן גם טמון ההסבר לדרישה, שהתנגדות מד הזרם צריכה להיות קטנה בהשוואה ליתר חלקי המעגל, המחוברים אליו בטור.

חיבור נגדים במקביל

בסוג זה של צירוף, הנגדים מחוברים כך, שלמעשה כולם קשורים בין שתי נקודות (עין בתרשים). זאת משום שהנחנו, שניתן להזניח את התנגשויות החוטים. במצב זה **המתח** בין קצוות שלושת הנגדים **זהה**:



חיבור נגדים במקביל

$$U_{tot} = U_1 = U_2 = U_3 \qquad (5)$$

בחיבור במקביל מפל המתח על כל אחד מהנגדים הוא זהה.

ציינו שמאחר שהמטען הכללי הזורם (או מספר אלקטרוני ההולכה) נשמר באופן כללי במעגל. על סמך זאת נוכל להסיק לגבי הקשר בין הזרם הכללי והזרמים שעוברים דרך כל אחד מהנגדים.

בשלב ראשון נציין, שמתוך שימור המטען הכללי הזורם נובע ישירות, שבפיצול הזרם הכללי לזרמים דרך הנגדים נוכל לרשום:

$$I_{tot} = I_1 = I_2 = I_3 \quad (6)$$

בחיבור במקביל הזרם הכללי שווה לסכום הזרמים דרך כל אחד מהנגדים.

על סמך חוק אוהם נציב את הביטוי עבור הזרמים דרך כל אחד מהנגדים ונקבל:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

או:

$$\frac{I}{U} = \frac{I}{R_1} + \frac{I}{R_2} + \frac{I}{R_3}$$

על סמך הגדרה של ההתנגדות השקולה: $R_{tot} = \frac{U_{tot}}{I_{tot}}$ נוכל להמשיך ולקבל על סמך הביטוי האחרון את הביטוי עבור התנגדות השקולה, במקרה של שלושת הנגדים הקשורים במקבילי:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (7)$$

נוכל להסכים, שבמקרה של n, נגדים שונים, המחוברים במקביל מקבלים עבור ההתנגדות השקולה שלהם:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n} \qquad (7a)$$

בחיבור במקביל סכום הערכים ההופכיים של התנגדויות הנגדים שווה לערך ההופכי של ההתנגדות השקולה של כל הנגדים.

ברור, שכאשר כל הנגדים המחוברים הם בעלי אותה התנגדות R, ההתנגדות השקולה בחיבור המקביל שלהם היא: $R_{tot} = \frac{R}{n}$

בדומה למקרה של חיבור טורי, נתעניין הפעם ביחס בין גודל הזרם דרך הנגדים. על סמך חוק אוהם נוכל לרשום: $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ו- $I_2 = \frac{U}{R_2}$. מכאן היחס בין הזרמים הוא:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

בחיבור נגדים במקביל, היחס בין הזרמים דרך הנגדים הפוך ליחס בין ההתנגדויות שלהם.

מכאן ברור, שדרך נגד, שהתנגדותו קטנה יותר יזרום בחיבור מקביל של הנגדים זרם בעוצמה גדולה יותר. כאן טמון ההסבר לדרישה לגבי התנגדותו הגבוהה מאוד של מד המתח לעומת הנגד, עליו אנו מבקשים למדוד את מפל המתח.

כמות החום הנפלט מנגד חשמלי

חוק אום יכול לעזור לקבלת ביטוי עבור **כמות החום**, הנפלטת מנגד, שדרכו זורם זרם חשמלי. תארנו את תהליך המעבר של מטען חשמלי בתוך מוליך, המלווה בהתנגשויות של אלקטרונים עם אטומי השריג, באמצעות ההמרה של האנרגיה הפוטנציאלית של אלקטרוני ההולכה לאנרגיה פנימית של המוליך. ברור, שתהליך זה גורם לחימום הנגד. הביטוי עבור השינוי של האנרגיה הפנימית במוליך הוא:

$$\Delta E_{in} = U \cdot I \cdot \Delta t \qquad (9)$$

הביטוי התקבל מעבודת הכוח החשמלי: $W_{electric} = U \cdot \Delta q$. אם נציב לתוך (9) את הביטוי של חוק אוהם עבור המתח: $U = I \cdot R$ נקבל:

$$\Delta E_{in} = \overbrace{I \cdot R}^{U} \cdot I \cdot \Delta t = I^2 \cdot R \cdot \Delta t \qquad (10)$$

ואם נציב את הביטוי עבור הזרם, $I = \frac{U}{R}$, נקבל את הביטוי השקול:

$$\Delta E_{in} = U \cdot \overbrace{\frac{U}{R}}^{I} \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t \quad (11)$$

למעשה נוכל לרשום שלושה ביטויים שקולים לשינוי באנרגיה הפנימית:

$$\Delta E_{in} = U \cdot I \cdot \Delta t \quad (12) \qquad \Delta E_{in} = I^2 \cdot R \cdot \Delta t \quad (13) \qquad \Delta E_{in} = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t \quad (14)$$

האם ישנה סתירה בין הביטויים? הרי מביטוי (12) "נובע", שכמות האנרגיה אינה תלויה ב- R, מביטוי (13) נובע, שהיא ביחס ישר ל- R ומביטוי (14) נובע, שהיא נמצאת ביחס הפוך ל-R.

התשובה היא, שהמתח, הזרם וההתנגדות קשורים ביניהם בחוק אוהם. אם נרצה להשוות בין כמות חום, הנפלטת משני נגדים שמחוברים בטור (תרשים א'), צריכים לעשות זאת באמצעות הביטוי: $\Delta E_{in} = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$. **הזרם**, העובר דרך שניהם הוא זהה ולכן יותר אנרגיה נבלעת בתוך נגד בעל התנגדות גבוהה יותר.



אם, לעומת זאת, שני נגדים מחוברים במקביל (תרשים ב'), ורוצים להשוות בין האנרגיות, הנבלעות בהם, יש להשתמש בנוסחה אחרת: $\Delta E_{in} = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t$. זאת משום שבמקרה זה הפרש הפוטנציאלים על שני הנגדים הוא זהה, ולכן יותר אנרגיה נבלעת בתוך הנגד בעל ההתנגדות הנמוכה יותר.



כאמור, ניתן לבטא כמות חום המתפתחת בנגד באמצעות הזרם, המתח והתנגדותו בהתאם לחיבור. אך קיימת תלות נוספת לאנרגיה שנבלעת בתוך נגד, והיא תלות בזמן: כשיותר זמן עובר, יותר אנרגיה נבלעת. תלות זו לפעמים מספקת (כמו במקרה של חשבון צריכת חשמל בבית), אך לפעמים לא, כאשר מתעניינים בקצב הספקת חום (למשל כאשר רוצים להתחמם באמצעות תנור חשמלי). במקרה השני מדובר באפיון באמצעות **הספק** (P), אשר מוגדר כ**קצב שינוי של אנרגיה** (בליעה או פליטה):

$$P = \frac{\Delta E_{in}}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t} \qquad (15)$$



ג'יימס וואט
1819 – 1736

כאן Q את מייצג כמות החום הנפלטת מהנגד.

ברור, שהספק נמדד ביחידה, שהיא תוצאת החלוקה של ג'ול בשנייה. יחידה זו מכונה גם וואט על שם המדען האנגלי בן המאה ה- 19, אשר חקר את מכונות החום: $1w = \frac{1j}{1sec}$

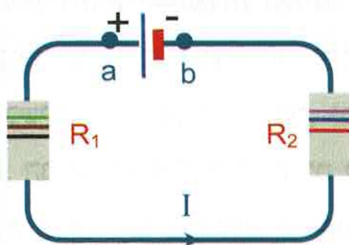
על סמך הביטויים (12), (13), (14) עבור האנרגיה, קל לקבל ביטויים מתאימים עבור ההספק.

$$P = U \cdot I \quad (16) \qquad P = I^2 \cdot R \quad (17) \qquad P = \frac{U^2}{R} \quad (18)$$

השיקול באיזה ביטוי להשתמש במקרה מסוים נשאר אותו שיקול, כפי שהצגנו בהקשר להערכה של האנרגיה המומרת בנגד.

המקור החשמלי הוא, כאמור, מתקן, הממיר אנרגיה כלשהי לאנרגיה פוטנציאלית חשמלית, המלווה בהפרדת מטענים. במקורות כגון **מצבר** או **סוללה**, מומרת אנרגיה כימית (חשמלית אטומית) של החומרים, המרכיבים את המקור, ובגנראטור מומרת אנרגיה קינטית ממקור כלשהו.

ברור, שאנו זקוקים לאפיון של תהליך ההמרה של האנרגיה הלא חשמלית בתוך המקור. חשוב גם שאפיון זה יהיה סגולי, כלומר, המרה של יחידת מטען חשמלי. אפיון זה מכונה כא"מ, קיצור של "כוח אלקטרו-מניע". כינוי זה אינו מדויק, כי כא"מ אינו כוח בכלל, אך זו המסורת שנשארה מן הימים שלא הייתה תמונה מודרנית על המתרחש בתוך המעגל בכלל ובתוך המקור בפרט. "כוח" בעבר וגם כיום, בשפה שאינה מדעית, מסמל "יכולת" כלשהי. לכן גם הכא"מ ברוח זו מאפיין **יכולת** המקור להפריד מטענים. גם אם זה מובן באופן כללי, נשארת בעיה: איך לקבל ביטוי מתמטי לגודל זה?



ניגש לבעיה זו דרך המעגל החיצוני, כלומר בין הנקודות a ו- b, שמחוץ למקור (עין בתרשים). במעגל זה מתרחשת המרה של אנרגיה חשמלית פוטנציאלית לאנרגיה לא חשמלית (פנימית של הנגדים). מידת ההמרה היא העבודה במעבר מטען q בין הנקודות a ו- b. עבודה זו היא: $W_{electric} = q \cdot U_{ab}$. אנרגיה בגודל זה, כולה הומרה לחום, מפני שתוספת האנרגיה הקינטית של אלקטרוני ההולכה היא זניחה. מצד שני, אם במעגל מתקיים מצב יציב ומתמשך חייב להתרחש תהליך הפוך, ובדיוק באותו הקצב: המרה מאנרגיה מסוג אחר לאנרגיה חשמלית. מישהו מבצע עבודה $W_{non-electric}$ בהיקף של:

$$W_{non-electric} = W_{electric} \qquad (19)$$

בדומה לעבודה החשמלית, שניתן להציג אותה במכפלה של המטען q והגודל הסגולי U_{ab} ($W_{electric} = U_{ab} \cdot \Delta q$), נרשום ביטוי מקביל גם לעבודה הלא חשמלית:

$$W_{non-electric} = q \cdot \varepsilon \qquad (20)$$

הגודל ε הוא לפי ההגדרה כוח אלקטרו- מניע, או כא"מ. כלומר, גודל ε הוא גודל, המקביל, להפרש פוטנציאלים (ולכן נמדד באותן היחידות – וולט), אך במהות הוא שונה

ממנו: זוהי עבודה ליחידת מטען של מקור לא חשמלי, היוצר את הפרש הפוטנציאלים במעגל החיצוני. רק כמותית הכא"מ אכן שווה להפרש הפוטנציאלים בין הנקודות a ו- b בחלק חיצוני של המעגל.

הפרדת המטענים במקור שקולה לזרם חשמלי. כאשר אנו מטפלים במצב עמיד במעגל, שימור כמות המטען במעגל כולו מחייב את הזרם הפנימי של המטענים, הנעים בתוך המקור, להיות שווה לזרם חיצוני במעגל, אם כי זרם זה אינו בהכרח זרם של אלקטרונים. בעקבות קיום הזרם ניתן לדבר גם על **התנגדות של המקור**, בדומה להתנגדות של הנגד לזרם אלקטרוני ההולכה. הביטוי לקיום ההתנגדות הפנימית הוא התחממות של המקור בעקבות מעבר הזרם דרכו. לאור השוויון בין הזרם הפנימי והזרם החיצוני ניתן לבטא את כמות החום Q, המתפתחת במקור, על ידי הביטוי:

$$Q = I^2 \cdot r \cdot \Delta t \qquad (21)$$

כאן r היא ההתנגדות הפנימית של המקור, ו- I הוא הזרם הכללי במעגל. כאשר המקור אינו מחובר למעגל ואין זרם, לא מתפתח חום במקור במצב עמיד.

כשיש המרת אנרגיה לחום, גם בתוך המקור משתנה איזון האנרגיה בתוך המערכת. חום, הנפלט בתוך המקור, תורם לאיזון כללי של אנרגיה, בדיוק כמו של החום, הנפלט בחלק המעגל החיצוני למקור. אנו יכולים לרשום את חוק שימור האנרגיה במעגל סגור באופן הבא:

$$\Delta E = \Delta E_{in1} + \Delta E_{in2} \qquad (22)$$

המרת אנרגיה במקור
מגורם חיצוני

המרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה
פנימית

המרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה
פנימית של המוליכים במעגל החיצוני
(התחממות הנגדים)

נבטא את האיזון האנרגטי, כפי שהוצג:

$$q \cdot \varepsilon = q \cdot U_R + q \cdot U_r \qquad (23)$$

כאן U_R מייצג את המתח על המעגל החיצוני בעל התנגדות שקולה R (מתח על הדקי המקור), ו- U_r מייצג את המתח על המקור בעל התנגדות r. מכאן:

$$\varepsilon = U_R + U_r \qquad (24)$$

אנו רואים, שקיום המתח על התנגדות פנימית של המקור שבר את השוויון הכמותי בין המתח על הדקי המקור לכא"מ. הם לא שווים יותר גם באופן כמותי.

לאחר שימוש בחוק אוהם ($U_R = I \cdot R$ ו- $U_r = I \cdot r$) נקבל:

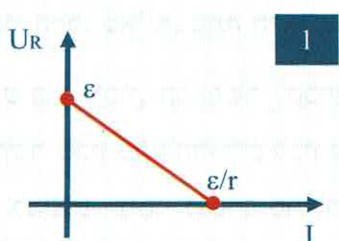
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \qquad (25)$$

ביטוי (25) מייצג את חוק אוהם למעגל השלם:

> הזרם הכללי במעגל פרופורציוני לכא"מ שבו,
> ונמצא ביחס הפוך להתנגדות הכללית של המעגל.

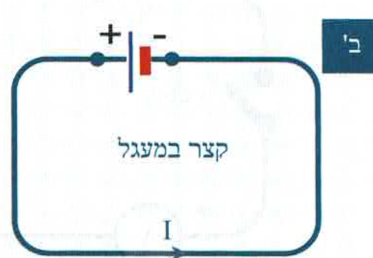
מביטוי (24) נובע הקשר של המתח בין הדקי המקור U_R, עוצמת הזרם (I), הכא"מ (ε) וההתנגדות הפנימית (r) של המקור:

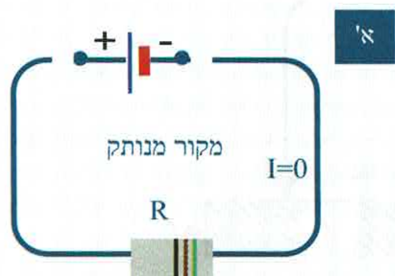
$$U_R = \varepsilon - I \cdot r \qquad (26)$$



גרף 1 מתאר את הקשר (26).

מהגרף ניתן לראות את מה שכבר נאמר: כאשר אין זרם במעגל ($I = 0$), מתח ההדקים שווה לכא"מ, והמעגל פתוח (תרשים א'). ניתן לראות גם את המקרה הקיצוני ההפוך: כאשר מתח ההדקים מתאפס (זהו המקרה של "קצר", תרשים ב'), הזרם גדל עד $\frac{\varepsilon}{r}$. זהו ערך גבוה מאוד, כי את המהירות הפנימית של המקור מנסים להוריד בכל מקרה עד למינימום האפשרי, על מנת להקטין את איבוד האנרגיה על חימום המקור.

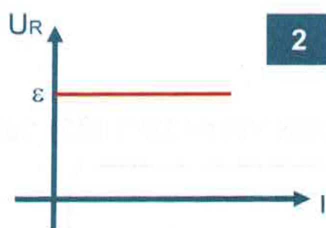




כשהמעגל החשמלי מנותק מן המקור, המתח בין הדקי המקור שווה לכא"מ.

במקרה של קצר בין הדקי המקור, הזרם גדל עד ל- ε/r (ערך גבוה מאוד).

מקור מתח מכונה "אידיאלי" כאשר ניתן להזניח את התנגדותו הפנימית לעומת התנגדות שקולה של המעגל החיצוני למקור. עבור מקרה זה ניתן להשתמש בקירוב $r=0$ ולקבל מתוך ביטוי 26 את חוסר התלות של המתח על הדקי המקור בזרם במעגל: $\varepsilon = U_R$ (גרף 2).



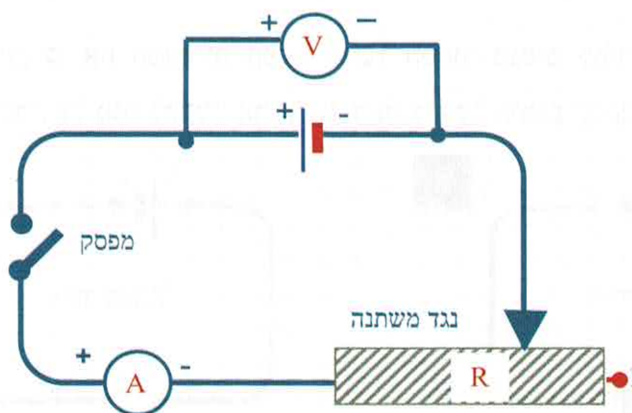
ניסוי חקר: כא"מ, מתח הדקים והתנגדות פנימית

נציע כאן ניסוי, המאפשר לקבוע את הכא"מ של מקור המתח, ההתנגדות הפנימית שלו והקשר שבין מתח ההדקים לבין עוצמת הזרם דרך המקור.

לביצוע הניסוי נצטרך סוללה של 1.5V, נגד- משתנה, מכשירי מד- מתח ומד- זרם, תילים.

מהלך הניסוי:

1. נרכיב את המעגל, כמתואר בתרשים.



2. נחבר את חוט המעגל לגררה של הנגד המשתנה. נכין טבלה עבור הקריאות של מד-המתח ומד- הזרם.

3. נקטין בהדרגה את התנגדות הנגד המשתנה כך, שבכל פעם תקטן הוראת מד המתח ב-0.1V. נבצע חמש מדידות ונרשום את הנתונים בטבלה.

V [וולט]						
[אמפר] I						

4. נחבר את הגררה של הנגד המשתנה עם נקודה 1. נרשום את הוראת המכשירים בטבלה.

5. נבנה גרף של המתח U (ציר אנכי) בתלות בזרם I (ציר אופקי). איזה קו התקבל?

6. מהי משמעות נקודת החיתוך של הגרף עם הציר האנכי? מהי משמעות נקודת החיתוך של הגרף עם הציר האופקי?

7. מצאו את הכא"מ של הסוללה ואת ההתנגדות הפנימית שלה.

8. אם מחברים את הגררה לנקודה 1 ומוסיפים נגד R בטור לנגד המשתנה, האם הוראת מד המתח תשתנה בהשוואה למצב בניסוי, שבו הגררה הייתה מחוברת לנקודה 1? הסבירו את התשובה.

סיכום הפרק

1. מתח חשמלי בין הנקודות 1 ו- 2 מוגדר כעבודה, המתבצעת על ידי הכוח חשמלי בהעברת יחידת מטען חיובי מנקודה 1 לנקודה 2: $U_{12} = \frac{W_{electric}}{q}$

2. את הקשר בין המתח החשמלי, המטען והשינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית והקינטית ניתן לבטא באופן הבא: $-\Delta E_{pot}^{electric} = \Delta E_{kin} = W_{electric} = U_{12} \cdot q$

3. זרם חשמלי הוא תנועה מכוונת של חלקיקים טעונים במטען חשמלי.

4. עוצמת הזרם החשמלי הוא קצב מעבר המטען החשמלי דרך חתך של המוליך:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

5. מקור מתח ממיר אנרגיה מסוג כלשהו לאנרגיה פוטנציאלית חשמלית של מטענים מפרדים.

6. במעגל החיצוני למקור המתח מומרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה פנימית של הנגדים, הגורמת לחימום שלהם.

7. בהזנחת שינוי ההתנגדות בגלל השינוי בטמפרטורה, במוליכים מתכתיים מתקיים קשר ישר בין המתח בקצוות הנגד והזרם, העובר דרכו (חוק אוהם):

$$U = I \cdot R$$

8. התנגדותו של נגד אומי (מוליך מתכתי) תלויה במימדיו ובחומר ממנו הוא עשוי:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

L – אורך הנגד (נמדד ביחידות מטר), S – שטח החתך (נמדד ביחידות ממ"ר),

ρ – התנגדות סגולית של חומר הנגד, שנמדד ביחידות $\left[\frac{\text{ממ"ר} \cdot \text{אום}}{\text{מטר}}\right]$.

9. כמות החום, הנפלטת בנגד, היא:

$$Q = U \cdot I \cdot \Delta t = I^2 \cdot R \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t$$

בהתאם לסוג החיבור של הנגדים.

10. עבור הספק חשמלי על הנגדים ניתן להשתמש בביטויים הבאים:

$$P = U \cdot I \qquad P = I^2 \cdot R \qquad P = \frac{U^2}{R}$$

בהתאם לסוג החיבור של הנגדים.

11.מד מתח מורכב במעגל החשמלי בין הנקודות, שמודדים הפרש פוטנציאלים ביניהן. יש לדאוג לכך שהתנגדותו תהיה גדולה בהרבה מזו של הנגד, עליו מודדיםאת המתח.

12.מד זרם מורכב במעגל החשמלי בחיבור טורי עם הנגד, דרכו מודדים את הזרם. יש לדאוג לכך, שהתנגדותו תהיה קטנה בהרבה מהתנגדותו של נגד זה.

13.בחיבור נגדים בטור ניתן לטעון עבור הזרמים:

$$I_{tot} = I_1 = I_2 = I_3$$

עבור המתחים:

$$U_{tot} = U_1 + U_2 + U_3$$

ועבור ההתנגדות השקולה של הנגדים:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3$$

14.בחיבור נגדים במקביל ניתן לטעון עבור הזרמים:

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3$$

עבור המתחים:

$$U_{tot} = U_1 = U_2 = U_3$$

ועבור ההתנגדות השקולה של הנגדים:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

15.כוח אלקטרו מניע, או כא"מ, מבטא את ההמרה ה"סגולית" (על יחידת מטען) של אנרגיה מסוג כלשהו לאנרגיה פוטנציאלית חשמלית של מטענים, שהופרדו בתוך המקור. כא"מ שווה כמותית לסכום מפלי הפוטנציאל על המעגל החיצוני ועל ההתנגדות הפנימית של המעגל:

$$\varepsilon = U_R + U_r$$

16.חוק אוהם עבור מעגל שלם הוא:

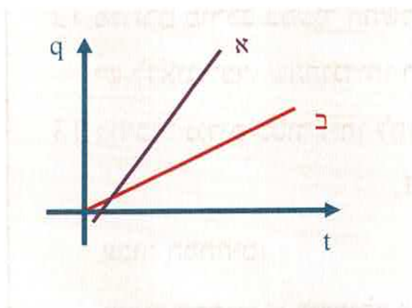
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

17.במעגל פתוח המתח על הדקי המקור שווה ל-כא"מ. במעגל סגור הקשר של המתח בין הדקי המקור, עוצמת הזרם (I), הכא"מ (ε) וההתנגדות הפנימית (r) של המקור הוא: $U_R = \varepsilon - I \cdot r$

18."קצר חשמלי" פירושו התאפסות התנגדות שקולה של המעגל החיצוני למקור (R=0). במצב זה גודל הזרם דרך המקור עולה עד ε /r.



1) כל אחד משני הגרפים (א' ו-ב' בשרטוט) מתאר כמות מטען שעברה דרך חתך של שני מוליכים בתלות בזמן. האם נכון ש:



א. עוצמת הזרם במוליך א' הייתה גדולה יותר?

ב. עוצמת הזרם במוליך ב' הייתה גדולה יותר?

ג. עוצמת הזרם בשני המוליכים הייתה שווה?

ד. לא ניתן לדעת באיזה מהמוליכים עוצמת הזרם הייתה גדולה יותר?

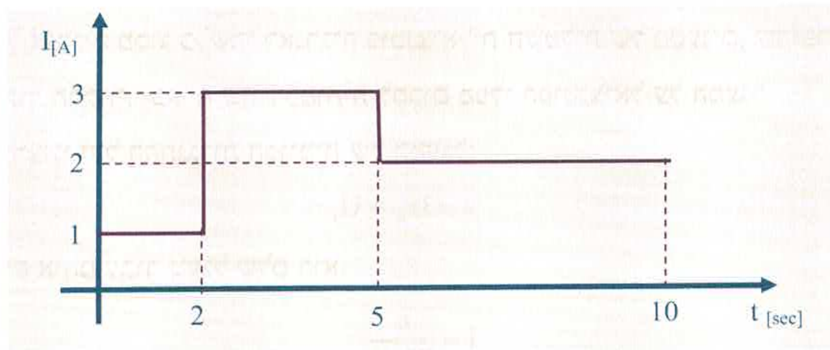
2) הגרף הבא מתאר את עוצמת הזרם החשמלי כפונקציה של זמן. כמות המטען, שעברה במוליך, הייתה גדולה ביותר:

א. בשתי השניות הראשונות.

ב. בפרק הזמן שבין 2 שניות ל- 4 שניות.

ג. בפרק הזמן שבין 4 שניות ל- 8 שניות.

ד. בפרק הזמן שבין 3 שניות ל- 7 שניות.



3) הנכון לגבי הכא"מ:

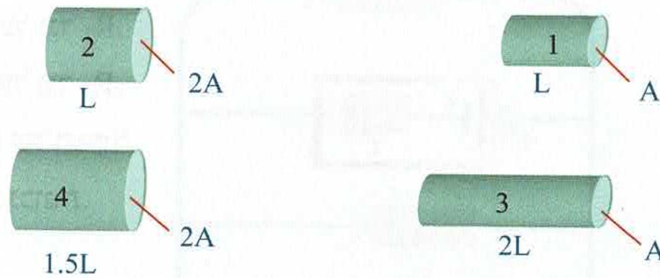
א. הוא שווה למתח ההדקים, כאשר המקור אידיאלי.

ב. הוא שווה למתח ההדקים, כאשר למעגל לא מחוברת התנגדות חיצונית.

ג. הוא מבטא את המתח במקור, כשהמקור אינו מחובר למעגל חשמלי.

ד. כל התשובות נכונות.

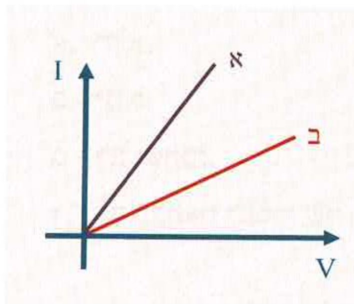
4) נתונים ארבעה מוטות, העשויים כסף:



המוט שהתנגדותו היא הקטנה ביותר הוא:

א. מוט מס' 1. ב. מוט מס' 2. ג. מוט מס' 3. ד. מוט מס' 4.

5) כל אחד משני הגרפים (א' ו-ב' בשרטוט) מתאר את הזרם כפונקציה של המתח עבור שני מוליכים שונים. האם נכון ש:



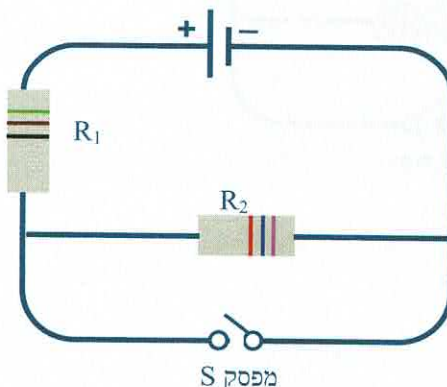
א. ההתנגדות של מוליך א' הייתה גדולה יותר?

ב. ההתנגדות של מוליך ב' הייתה גדולה יותר?

ג. המוליכות של מוליך ב' הייתה גדולה יותר?

ד. לא ניתן לדעת, לאיזה מוליך יש מוליכות גבוהה יותר?

6) נתון מעגל חשמלי, כמתואר בשרטוט. כאשר יסגרו את המפסק S, עוצמת הזרם במעגל:



א. תגדל.

ב. תקטן.

ג. לא תשתנה.

ד. תהיה שווה לאפס.

7) נתון המעגל החשמלי הבא:

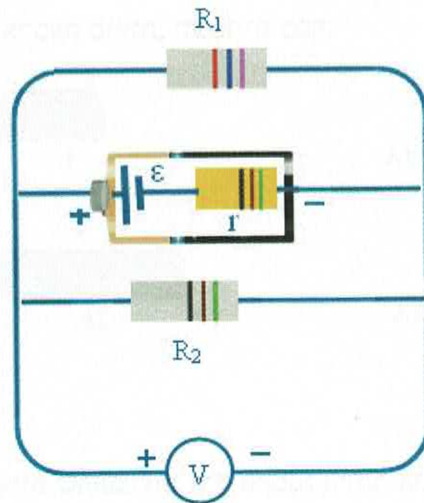
במצב זה מד המתח מורה את:

א. מפל המתח על נגד R_1.

ב. מפל המתח על נגד R_2.

ג.מתח ההדקים של המקור.

ד.כל התשובות נכונות.



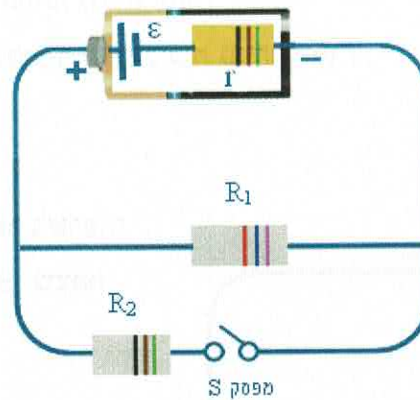
8) כאשר נסגור את המפסק S במעגל החשמלי שלפנינו, מתח ההדקים:

א. יקטן.

ב. יגדל.

ג. לא ישתנה.

ד. רק בהתאם לערכו של R_2 ניתן לדעת, אם מתח ההדקים יקטן או יגדל.





אנרגיה פוטנציאלית חשמלית

1. מה תפקידו של מקור המתח החשמלי ?

2. ציינו ארבעה גדלים, בהם תלויה ההתנגדות. כיצד כל אחד מהגדלים משפיע על ערכה.

3. כאשר מקרבים שני מטענים זה לזה, האם גדלה האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית? נמקו!

4. מהו חוק אוהם? האם הוא מתקיים עבור כל המוליכים המתכתיים, ובאילו תנאים ?

5. רישמו מספר דוגמאות בהן הכוח החשמלי:
   א. מבצע עבודה חיובית.
   ב. מבצע עבודה שלילית.

6. א. רשום שלושה ביטויים עבור ההספק החשמלי.
   ב. האם ההספק נמצא ביחס ישר להתנגדות? נמקו!

7. א. מהן הדרישות ממד מתח וממד זרם, כדי שיורו על קריאה מדויקת?
   ב. כיצד יש לחברם למעגל החשמלי? נמק!

8. ציינו מצבים, בהם הכא"מ שווה למתח ההדקים. נמקו!

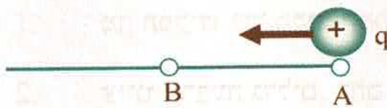
9. מה ההבדל בין עבודה סגולית חשמלית (מתח) להמרה סגולית במקור (כא"מ)?

10. במערכת החשמל הביתית מחוברים צרכנים במקביל. מהם היתרונות של חיבור זה על פני החיבור הטורי ?

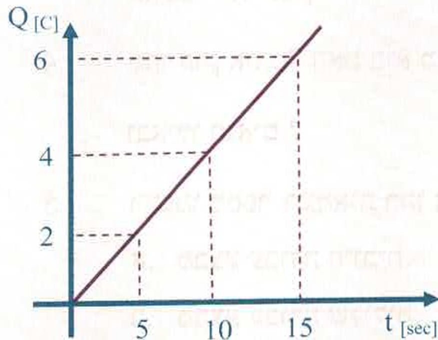


שאלות חישוב

1) מהי העבודה המושקעת, כאשר מטען של 0.04 קולון מועבר מנקודה A לנקודה B, אם הפרש הפוטנציאלים בין שתי הנקודות הוא 220 וולט?



2) הגרף הבא מתאר תלות בזמן של כמות מטען, העוברת דרך חתך של מוליך. חשבו את עוצמת הזרם, שעברה דרך המוליך.

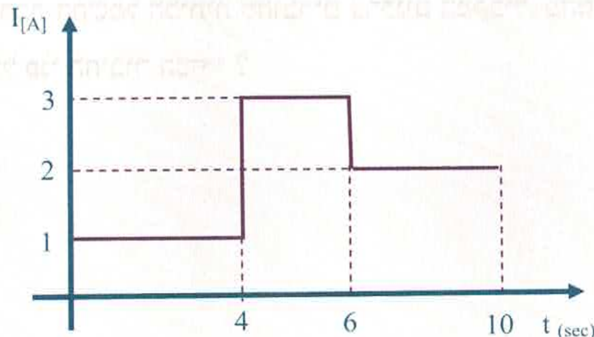


3) הגרף הבא מתאר את עוצמת הזרם כפונקציה של הזמן.

א. מהי כמות המטען, שעבר במוליך ב-4 השניות הראשונות?

ב. מהי כמות המטען, שעבר במוליך בפרק הזמן שבין 2 שניות ל-10 שניות?

ג. האם מספר האלקטרונים, שעברו במוליך, היה גדול יותר ב-4 השניות הראשונות או ב- 2השניות האחרונות? נמקו!



4) במוליך מסוים זורם זרם של 1.5 אמפר במשך 2 שניות. לאחר מכן עובר במוליך מטען בן 15 קולון, כשעוצמת הזרם היא 3 אמפר. ולבסוף ב- 4 השניות האחרונות עוצמת הזרם היא 2.5 אמפר.

א. חשבו את המטען הכולל, שעבר במוליך.

ב. באיזה עוצמת **זרם קבוע** הייתה עוברת במוליך אותה כמות מטען, שחישבתם בסעיף א' עבור אותו פרק זמן כולל (זרם זה נקרא: זרם ממוצע)?

5) למוליך מסוים, שאורכו 3 מטר, יש התנגדות של 0.5 אוהם. אם ניקח תיל שאורכו 90 מטר, בעל אותו שטח חתך והעשוי מאותו חומר מוליך, מה תהיה התנגדותו של תיל זה?

6) חשבו את התנגדותו של כבל נחושת, שאורכו 0.5 ק"מ ושטח חתכו 150 ממ"ר

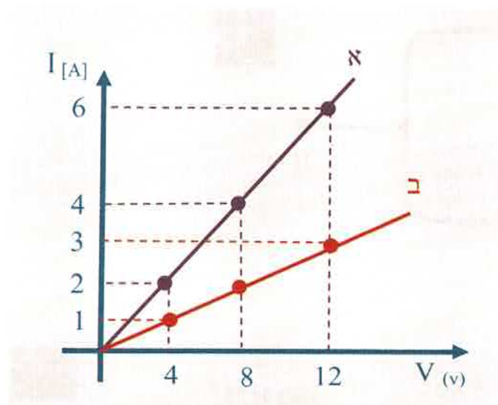
(ההתנגדות הסגולית של נחושת: $\rho= 0.018 \left[\frac{\text{ממ"ר}\cdot\text{אום}}{\text{מטר}}\right]$).

7) כאשר המתח בין קצותיו של תיל מסויים הוא 6 וולט, זורם דרכו זרם של 4 אמפר. חשבו את התנגדותו הסגולית של התיל, אם אורכו 1 מטר, ושטח חתך הרוחב שלו 0.4 ממ"ר.

8) הגרף הבא מתאר את עוצמת הזרם, העובר דרך שני נגדים.

א. מצאו את התנגדותו של כל אחד מהנגדים.

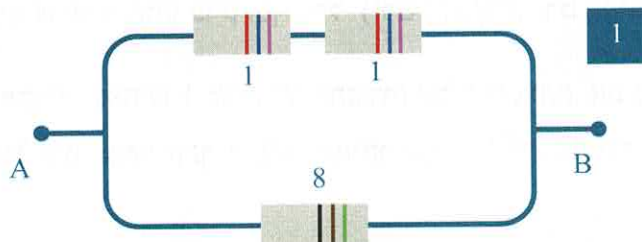
ב. אם ידוע, ששני הנגדים עשויים מאותו חומר מוליך, איזה נגד ארוך יותר?

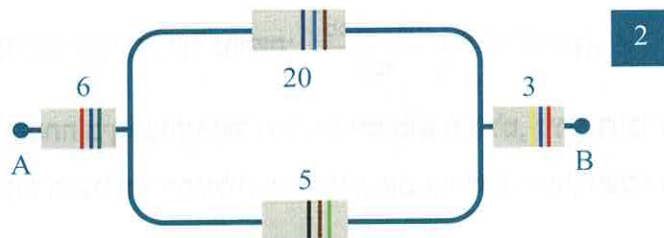


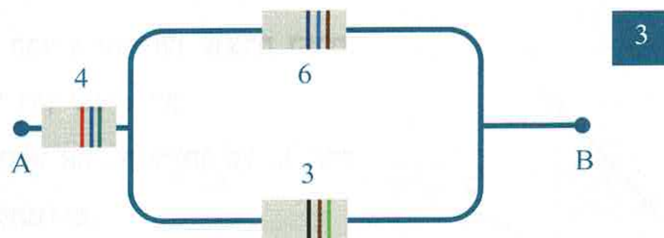
9) א. חשבו את ההתנגדות השקולה עבור כל אחד מהצירופים, המתוארים בשרטוטים.

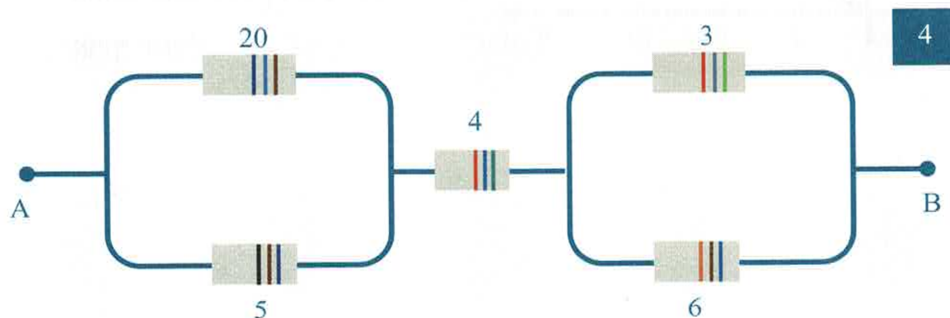
(הערה: המספרים המופיעים בשרטוטים הם התנגדויות הנגדים; כל ההתנגדויות ביחידות אוהם).

ב. אם המתח בין נקודות A ו-B הוא 10 וולט, מצאו את הזרם העובר דרך כל אחד מהנגדים.

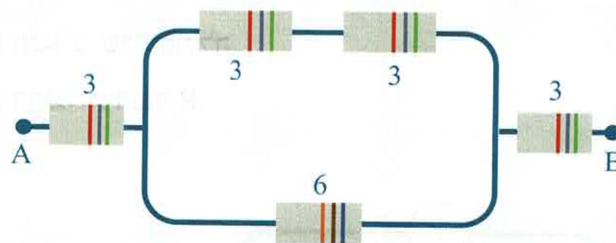




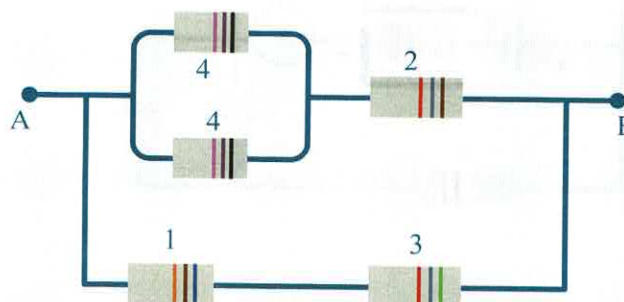




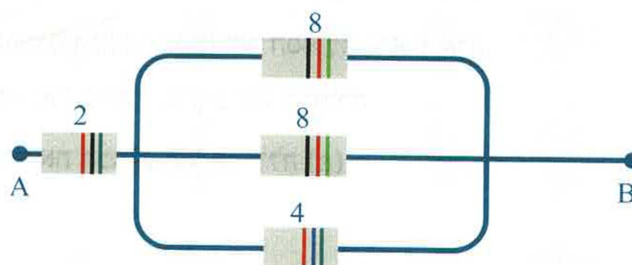
5



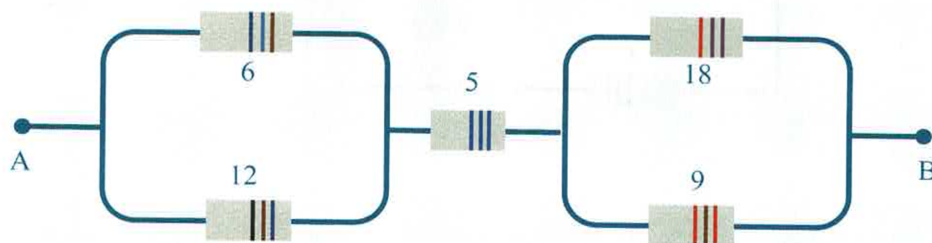
6



7



10) דרך נגד, שהתנגדותו 5 אוהם, זורם זרם, שעוצמתו 4 אמפר. מצאו את המתח בין הנקודות A ו- B.



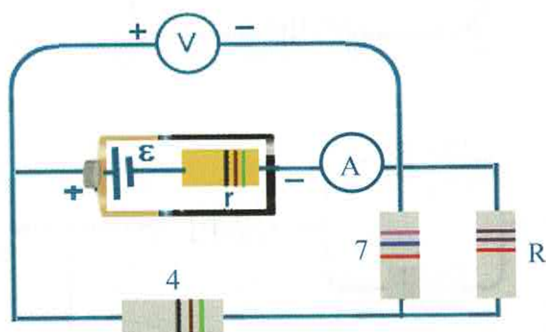
11) במעגל המתואר בשרטוט מד המתח מורה על 15 וולט, ומד הזרם- על 2 אמפר.

(המכשירים אידיאליים).

ידוע, שהתנגדותה הפנימית של הסוללה 1 אוהם.

א.מצאו את הכא"מ של הסוללה.

ב.מצאו את התנגדות הנגד R.

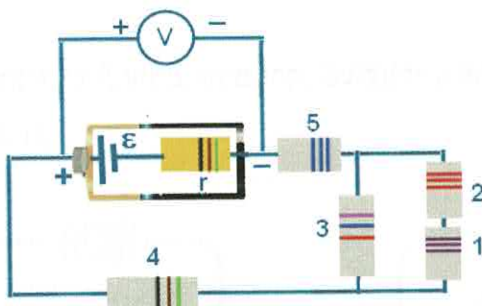


12) במעגל החשמלי שלפניך הזרם על הנגד של 1 אום הוא 3 אמפר.

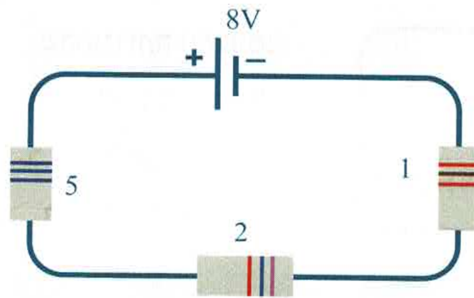
ידוע שהתנגדותה הפנימית של הסוללה היא 1 אום.

א. מצאו את מתח ההדקים של הסוללה.

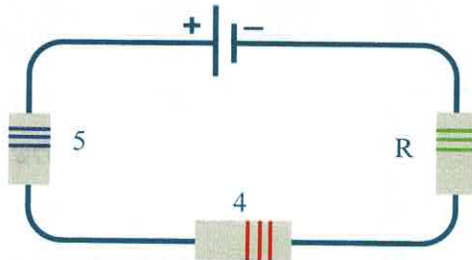
ב. מצאו את הכא"מ של הסוללה (ε).



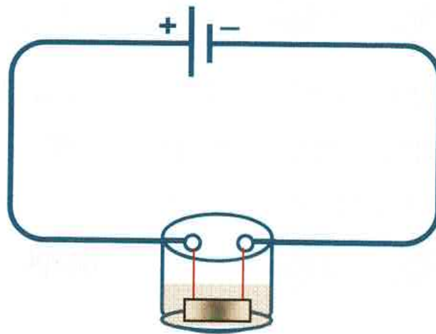
13) חשבו את עוצמת הזרם, העובר דרך כל אחד מהנגדים, ואת המתח בכל אחד מהם.
(מקור המתח אידיאלי).



14) חשב את מתח מקור הזרם ואת התנגדות הנגד R, אם ידוע, שהמתח בנגד, שהתנגדותו 5 אום, הוא 10 וולט, והמתח בנגד R הוא 8 וולט.



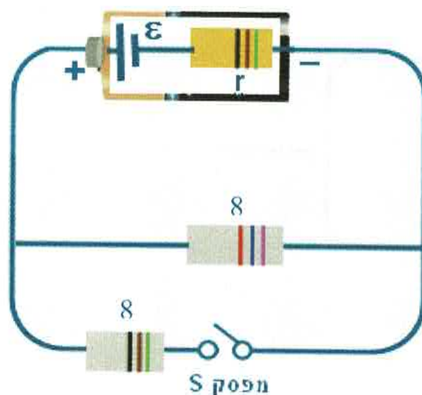
15) דרך נגד הטבול בקלורימטר הועבר זרם של 0.5 אמפר במשך 3 דקות. אם בפרק זמן זה כמות החום, שפלט הנגד, הייתה 100 ג'ול, מהי התנגדותו?



16) כאשר המפסק פתוח, במעגל החשמלי המתואר בשרטוט מתח ההדקים הוא 20 וולט, וכאשר המפסק סגור,מתח ההדקים הוא 15 וולט מצא את:

א. הכא"מ של המקור.

ב. ההתנגדות הפנימית של המקור.

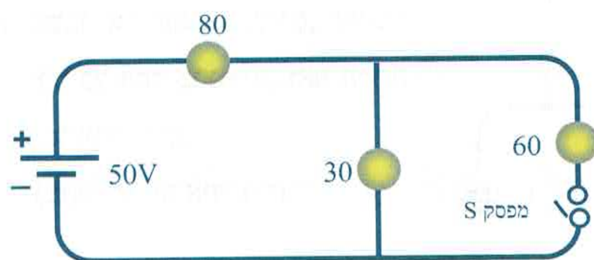


17) מהו ההספק בנורה שהתנגדותה 80 אום:

א. כשהמפסק פתוח?

ב. כשהמפסק סגור?

המקור אידיאלי (r=o)

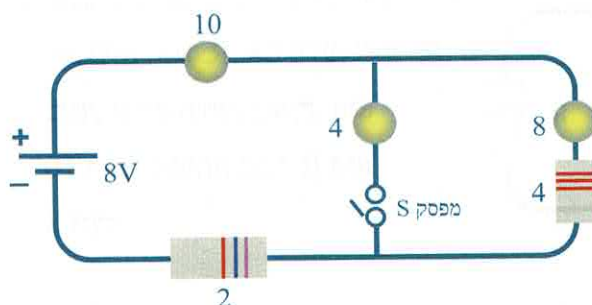


18. מצאו את ההספק של כל נורה במעגל החשמלי שלפניכם:

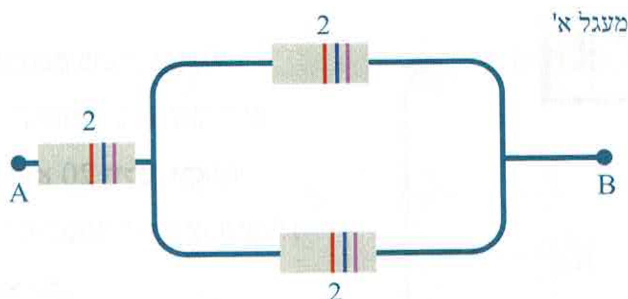
א. כשהמפסק פתוח.

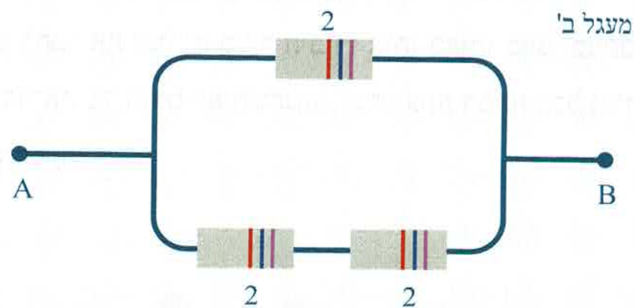
ב. כשהמפסק סגור.

המקור אידיאלי (r=o).



19) נתונים שלושה נגדים, שהתנגדות כל אחד מהם 2 אוהם. ניתן להזרים דרך כל נגד זרם מקסימאלי של 5 אמפר. הנגדים חוברו בשני מעגלים שונים (ראו סרטוט). לאיזה מתח מקסימאלי ניתן לחבר כל אחד מהמעגלים (בנקודות A ו- B) בלי לשרוף אף נגד.



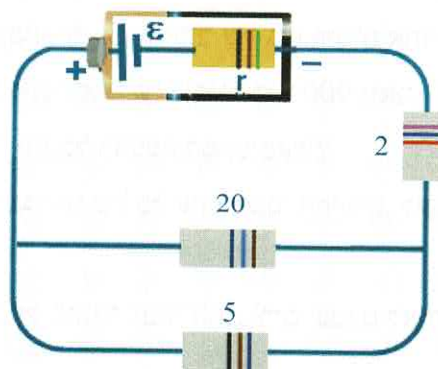


20) במעגל החשמלי, המתואר בשרטוט כא"מ, המקור הוא 6 וולט והתנגדותו הפנימית 1 אוהם. חשבו את:

א. עוצמת הזרם בנגד שהתנגדותו 2 אום.

ב. מתח ההדקים של המקור.

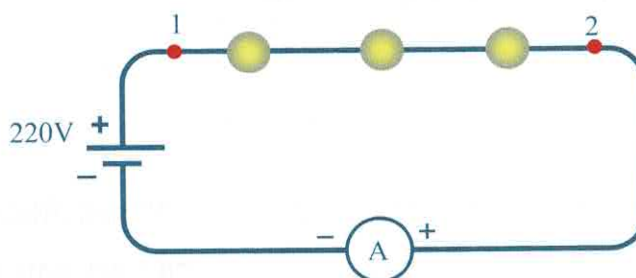
ג. ההספק המתפתח בנגד שהתנגדותו 5 אום.



21) שלוש נורות זהות חוברו בטור בין הנקודות 1 ו- 2 למקור מתח של 220 וולט. מד הזרם הראה קריאה של 0.5 אמפר.

א. חשבו את המתח בכל נורה, את התנגדותה ואת הספקה.

ב. במקום לחבר את הנורות בטור חיבורו אותן באותו מעגל במקביל, בין הנקודות 1 ו-2, והוראת מד הזרם לא השתנתה. מהו עתה המתח בכל נורה? מהי התנגדותה ומהו הספקה?



22) לתנור חימום חשמלי ישנם שני גופי חימום זהים. ניתן לשנות את קצב החימום בעזרת מתג, המחבר את שני גופי החימום בשלושה מצבים אפשריים:

1. בטור. 2. במקביל. 3. חיבור של גוף חימום אחד בלבד.

ידוע, שהספקו המקסימאלי של התנור הוא 900 וואט.

א. באיזה חיבור יתקבל ההספק המקסימאלי?

ב. חשבו את התנגדותו של כל אחד מגופי החימום, כשהמתח בכל אחד מהם הוא 220 וולט.

ג. חשבו את הספק התנור עבור החיבורים שבהם לא התקבל הספק מקסימאלי.

תשובות

1) ג'ול $W = 8.8$. **2)** $I = 0.4$ אמפר. **3)** א. 4 קולון. ב. 16 קולון. ג. שווה.

4) א. 28 קולון. ב. 2.54 אמפר. **5)** 15 אוהם. **6)** 0.06 אוהם.

7) $\rho = 0.6\ \frac{\text{ממ"ר} \cdot \text{אוהם}}{\text{מטר}}$.

8) א. $R_{(א)} = 2$ אוהם, $R_{(ב)} = 4$ אוהם. ב. נגד ב' ארוך יותר.

9) א. 1) 1.6 אוהם. 2) 13 אוהם. 3) 6 אוהם. 4) 10 אוהם. 5) 9 אוהם.
6) 2 אוהם. 7) 4 אוהם.

ב. 1) $I_{(1)} = 5$ אמפר, $I_{(8)} = 1.25$ אמפר.

2) $I_{(3)} = I_{(6)} = 0.77$ אמפר, $I_{(20)} = 0.15$ אמפר, $I_{(5)} = 0.615$ אמפר.

3) $I_{(4)} = 1.66$ אמפר, $I_{(6)} = 0.55$ אמפר, $I_{(3)} = 1.11$ אמפר.

4) $I_{(4)} = 1$ אמפר, $I_{(20)} = 0.2$ אמפר, $I_{(5)} = 0.8$ אמפר, $I_{(3)} = 0.66$ אמפר,
$I_{(6)} = 0.33$ אמפר.

5) 1.11 אמפר, 0.55 אמפר.

6) $I_{(1)} = I_{(2)} = I_{(3)} = 2.5$ אמפר, $I_{(4)} = 1.25$ אמפר.

7) $I_{(2)} = 2.5$ אמפר, $I_{(8)} = 0.625$ אמפר, $I_{(4)} = 1.25$ אמפר.

10) 60 וולט. **11)** א. $\varepsilon = 17$ וולט. ב. $R = 7$ אוהם. **12)** א. 63 וולט. ב. 69 וולט.

13) $I = 1$ אמפר, $V_{(5)} = 5$ וולט, $V_{(2)} = 2$ וולט, $V_{(1)} = 1$ וולט.

14) 26 וולט, 4 אוהם. **15)** $R = 2.22$ אום.

16) א. $\varepsilon = 30$ וולט. ב. $r = 4$ אוהם.

17) א. $P = 16.52$ וואט. ב. $P = 20$ וואט.

18) א. $P_{10} = 1.11$ וואט, $P_8 = 0.88$ וואט. ב. $P_{10} = 2.84$ וואט, $P_4 = 0.64$ וואט,
$P_8 = 0.142$ וואט.

19) מעגל א' – 15 וולט, מעגל ב' – 10 וולט.

20) א. $I_{(2)} = 0.857$ אמפר. ב. 5.143 וולט. ג. $P_{(5)} = 2.35$ וואט.

21) א. $V = 73.33$ וולט, $R = 146.66$ אוהם, $P = 36.66$ וואט.

ב. $V = 220$ וולט, $R = 1320$ אוהם, $P = 36.66$ וואט.

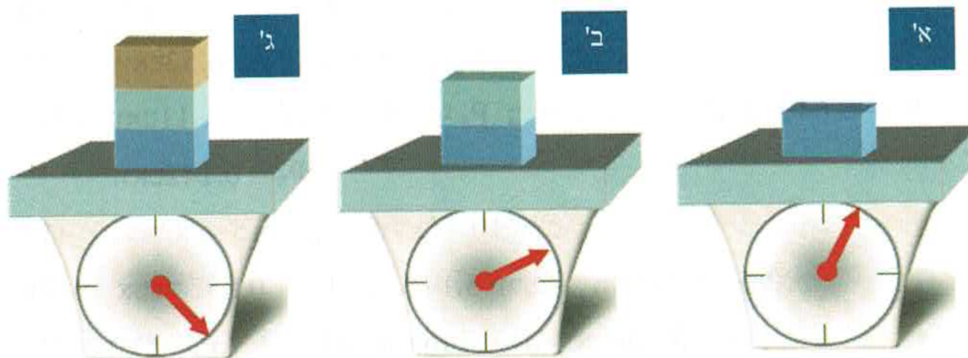
22) א. בחיבור מקבילי. ב. $R = 107.55$ אוהם. ג. 450 וואט, 225 וואט.

למרות המגוון הרחב ביותר של סוגי הגופים והחומרים שסביבנו, נשים לב לכך, שרובם מצויים בשלושה מצבי צבירה: **מוצק, נוזל וגז.** עקב התכונה המשותפת של הגופים במצב **נוזלי** ובמצב **גזי** של אי שמירה על הצורה המרחבית של החומר, מצבים אלה מכונים **זורמים.** קיים מצב צבירה נוסף, שבו נמצא חומר בטמפרטורה גבוהה. זהו מצב **פלסמה.** גם במצב זה החומר אינו שומר על צורתו, על צורת הנפח שהוא תופס, ולכן ניתן לכלול גם את מצב הפלסמה בין הזורמים.

בתיאור ההשפעה בין גופים או בין שכבות חומר, אשר מצויות במגע, נצטרך להשתמש במושג שיאפיין השפעה זו. מושג זה נקרא **לחץ.** כמו המושג "כוח", מופיע המושג לחץ בשפה היום-יומית בהקשרים שונים, שאינם פיזיקאליים דווקא: לחץ חברתי, לחץ נפשי, לחץ דם וכד'. לכן חשוב להגדיר את המושג באופן מדויק, כפי שמשתמשים בו במדע. נבהיר את מושג הלחץ בשלוש הדגמות.

הדגמה מס' 1

נניח קערה ובתוכה מלט בצורת אבקה על כף מאזני-קפיץ. נשווה בין שלושה מצבים: **מצב א** – לבנה אחת מונחת על המלט שבקערה, **מצב ב'** –שתי לבנים מונחות זו על זו, **מצב ג** –שלוש לבנים מונחות, כמתואר בתרשים.



ברור, שבכל אחד משלושת המצבים תהיה **קריאת המשקל שונה.** במצב א' קריאת המשקל היא הקטנה ביותר, ובמצב ג' – הגדולה ביותר. נשים לב גם לעובדה שעומק

השקיעה של הלבנים במלט משתנה בכל פעם, ותלוי במספר הלבנים. כך, **עומק השקיעה** במצב א' הוא הקטן מבין המקרים, ובמצב ג' – הגדול ביותר.

בשלושת המצבים לא השתנה **שטח המגע** של הלבנים עם המלט. נוכל לסכם ש:

בהגדלת הכוח על המלט ללא שינוי השטח, שבמגע איתו, גדל עומק השקע.

נרשום את המסקנה באופן סימבולי:

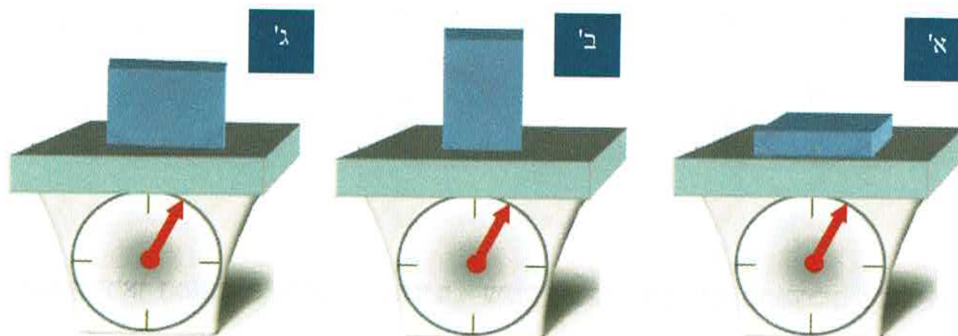
$$h \propto F \qquad \text{(A נשמר)} \qquad (1)$$

סימנו ב-F את גודל הכוח, ב- h את עומק השקע וב- A את שטח המגע של הלבנה עם המלט.

בבדיקה יותר קפדנית היינו יכולים לגלות, שהקשר בין עומק השקע לבין הכוח המופעל הוא **יחס ישר**, כלומר, אם נגדיל את הכוח, עומק השקע יגדל בדיוק באותו יחס.

הדגמה מס' 2

בהדגמה זו נשתמש באותו ציוד. הפעם נניח בקערה עם המלט לבנה אחת, ובכל פעם נעמיד אותה על פאה אחרת . נשקול אותה שלוש פעמים (ראה תרשים).



נשים לב, שבכל אחת מן השקילות נשמרת קריאת המאזניים (המשקל), אך עומק השקיעה במלט הוא שונה. השינוי בשקיעה יכול להפתיע: הרי משקלה של הלבנה אינו משתנה. במצב א' יהיה עומק השקע הקטן ביותר, ובמצב ג' – הגדול ביותר. השינוי בין המצבים הוא **בשטח המגע** של הלבנה עם המלט: במצב א' הוא הגדול ביותר ובמצב ג' – הקטן ביותר. כלומר, התוצאה שקיבלנו היא:

בהגדלת שטח המגע עם המלט ללא שינוי בגודל הכוח, קטן עומק השקע.

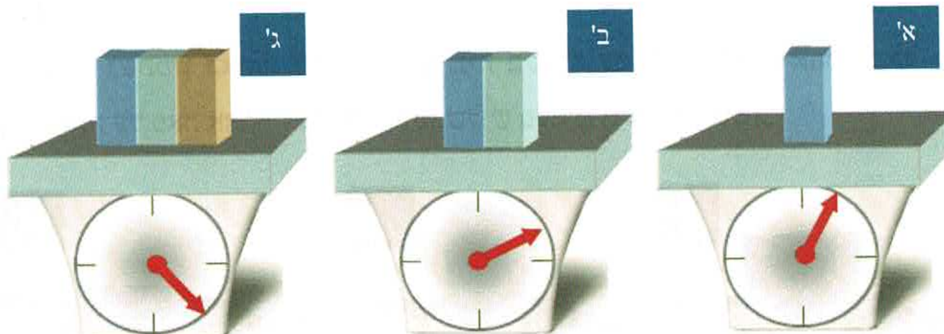
נרשום את המסקנה באופן סימבולי באותם סימנים:

$$h \propto \frac{1}{A} \qquad (2) \qquad (\text{נשמר } F)$$

מבדיקה של התוצאות באופן כמותי מתברר, שגודל השקע נמצא **ביחס הפוך** לשטח המגע. **יחס הפוך** פירושו, שהקשר בין הגדלים הוא כזה, שכאשר **נגדיל** אחד מהם, השני יקטן באותו יחס.

הדגמה מס' 3

הפעם נניח לבנים זהות בשלושת המצבים הבאים: א': לבנה אחת, ב' נוסיף לידה לבנה אחת בדיוק באופן, שבו מונחת הלבנה הראשונה (על אותה פאה), ו- ג' נוסיף שתי לבנים באותו אופן (עיין בתרשים).



הפעם יראו המאזניים משקלים **שונים**. עומק השקע בכל אחד מהמצבים נשאר זהה. תוצאה זו מובנת, הרי ניתן לראות את הלבנים כבלתי תלויות. כל אחת שוקעת במלט ללא קשר לקיום האחרות. כדי להתחבר לתוצאות ההדגמות הקודמות נציין, שאת השקילה השנייה ניתן לראות כשקילה של גוף אחד בעל משקל כפול ושטח תמיכה כפול. באותו האופן, את השקילה השלישית ניתן לפרש כשקילה של גוף בעל משקל גדול פי שלושה ובעל שטח בסיס גדול פי שלושה. עתה למסקנה. את גודל השקיעה, הנשמר בשלוש השקילות בהדגמה זו, ניתן לקשר לגודל, הנשמר בשקילות אלו: היחס בין הכוח המופעל על המלט ושטח הבסיס של הגוף המונח עליו. גודל זה קובע, כפי שרואים, את עומק השקיעה בכל מצב.



אם משקל הגוף גדל באותה המידה כמו שטח התמיכה שלו, עומק השקע נשמר. לכן עומק השקע נקבע על ידי היחס בין המשקל לשטח הבסיס.

על סמך כל ההדגמות אנו מגיעים לרעיון, שמוצדק להגדיר את היחס בין הכוח לבין שטח הבסיס כמדד חשוב להשפעת הגוף על התמיכה. גודל זה הוא **הלחץ**, שסימונו בדרך כלל p,(מהמונח באנגלית pressure). כלומר, הביטוי המתמטי עבור גודל הלחץ בסימונים שבחרנו הוא:

$$P = \frac{F}{A} \qquad (3)$$

הגדרה זו תואמת את תוצאות כל ההדגמות, בהן צפינו. בהדגמה הראשונה ראינו את עומק השקיעה, אותו קישרנו עם הלחץ, הפרופורציוני לגודל הכוח, שהופעל על המלט, נוסחה (1), ובהדגמה השנייה ראינו, שעומק השקיעה נמצא ביחס הפוך לגודל שטח הבסיס, נוסחה (2). שתי התוצאות כלולות בתוך נוסחה (3).

יחידות הלחץ

נשתמש בהגדרה (3) על מנת להכיר את היחידות, בהן נמדוד את גודל הלחץ. מאחר שיחידות הכוח האפשריות הן – למשל: גר"כ, קג"כ, ניוטון, וגם את שטח המגע מודדים ביחידות שונות: ממ"ר, סמ"ר, מ"ר – ישנן יחידות שונות האפשריות עבור הלחץ. בתחומים שונים נוח להשתמש ביחידות שונות, בהתאם לגדלי הלחץ המופיעים.

א. היחידה הנפוצה ביותר בטכנולוגיה מכונה **אטמוספרה.** לחץ זה מתקבל כאשר משתמשים ביחידות קג"כ עבור הכוח ובסמ"ר עבור שטח בסיס. כלומר: 1 אטמוספרה היא הלחץ, שנוצר בהפעלת כוח של 1 קג"כ במאונך לשטח של 1 סמ"ר. הסיבה לקביעת יחידה זו נעוצה בעובדה, שהלחץ, שמפעילה שכבת האוויר סביב כדור- הארץ על הגופים שעל פני כדור הארץ, שווה בערך לאטמוספרה אחת (הלחץ משתנה ממקום למקום בהתאם לגובה ולמזג האוויר).

ב. כאשר מבטאים את הכוח ביחידות ניוטון, ואת שטח המגע - במ"ר, יחידת הלחץ תהיה **פסקל.**

כלומר, 1 פסקל הוא הלחץ, שמפעיל כוח של 1 ניוטון על 1 מ"ר. יחידה זו היא הטבעית לחישובים במסגרת המדעית, בה מקובל הניוטון כיחידת כוח, והמטר - כיחידת אורך.

דוגמאות

במקרים רבים דווקא גודלו של הלחץ, ולא של הכוח, הוא החשוב והקובע את ההתנהגות של מערכות שונות, ולכן הוא הנושא למודעות ולדאגות.



א. ללחצים קטנים זקוקים על מנת להקטין את השקיעה בסוגים מיוחדים של הקרקע כגון: חולות, ביצות, מים וכו'. במקרים כאלה הנתון הוא המשקל, אותו לא רוצים לשנות, והגורם המשתנה הוא שטח הבסיס. במקרה זה הגדלת שטח בסיס מורידה את הלחץ ואיתו - גם את גודל השקיעה. למשל: טנק, שמשקלו רב, עלול להפעיל לחץ גדול על אדמת חול, ולשקוע. כדי למנוע זאת יש להוריד את הלחץ, ולשם כך - להגדיל את שטח המגע של השרשראות. כדאי לעשות זאת, למרות שהגדלת שטח השרשראות מגדיל את משקל הטנק, ומעמיס על המנוע. למרות זאת מתברר, שהגדלת שטח בסיס יכולה להיות יותר משמעותית בהצלחת המשימה כולה. כמובן, בתכנון זה מתבססים על הגדרת הלחץ לפי הנוסחה F/A , וקובעים את התוצאה.



ב. המקרים, בהם זקוקים ללחצים גבוהים במיוחד, הם המקרים, בהם משתמשים בכלים דוקרים. נדגים את המקרים הפשוטים ביותר. בעת שאנו נועצים נעצים, או תוקעים מסמרים בקיר, או תופרים במחט, אנו חייבים להגדיל את הלחץ, כדי לאפשר חדירה לתוך גוף אחר, הצפוף ומתנגד ליצירת חוד ולהחדרה לתוכו. במקרים אלה מקטינים במיוחד את שטח הפנים של הכלי, וכך יוצרים לחצים גבוהים מאוד. יש לזכור, שהקטנת השטח מלווה בהקטנת חוזק של הכלי, אשר הופך להיות שביר יותר. כמו בכל דבר, יש מקום לשיקול בהתאם לתנאים. בכל מקרה, גודל היחס F/A הוא הגורם הקובע.



לפעמים הלחץ על הקרקע הוא הקובע ולא משקל הגוף. את שיעורו אפשר לתכנן בהתאם למצב על- פי היחס F/A.

1) איזה לחץ, בקירוב, מפעיל אדם על הקרקע ?

א. 100 פסקל

ב. 1000פסקל

ג. 10000 פסקל

ד. 100000 פסקל

2) האם ייתכן מצב, בו אדם יפעיל על הקרקע לחץ גדול יותר מאשר טנק ?

א. ייתכן.

ב. לא ייתכן.

ג. תלוי בסוג הקרקע.

ד. רק במקרה בהם אדם שמן במיוחד.



3) נהג מעוניין לנסוע עם רכבו על חול- ים. אייעץ לו:

א. למלא עוד קצת אוויר בצמיגים.

ב. להוציא מעט אוויר מהצמיגים.

ג. להשאיר את הצמיגים במצב שהיו.

ד. להוציא את כל האוויר מהצמיגים.



4) מניחים דסקית מתחת לראש בורג:

א. כדי להגדיל את הלחץ, שראש הבורג מפעיל על המשטח.

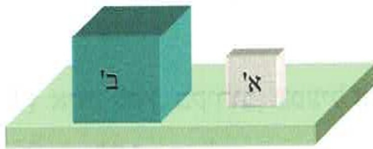
ב. כדי להקטין את הלחץ, שראש הבורג מפעיל על המשטח.

ג. כיוון שזה נראה אסתטי יותר.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

5) קוביות א' ו- ב' עשויות מחומרים שונים ומונחות

על משטח. האם נכון ש:



א. שתיהן מפעילות לחץ שווה ?

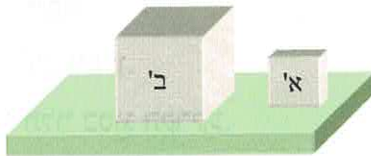
ב. קובייה א' מפעילה לחץ גדול יותר מאשר קובייה ב' ?

ג. קובייה ב' מפעילה לחץ גדול יותר מאשר קובייה א' ?

ד. אין לנו די נתונים לדעת איזו משתי הקוביות מפעילה לחץ גדול יותר ?

6) קוביות א' ו- ב' עשויות מאותו חומר ומונחות

על אותו משטח. האם נכון ש:



א. שתיהן מפעילות לחץ שווה ?

ב. קובייה א' מפעילה לחץ גדול יותר מאשר קובייה ב' ?

ג. קובייה ב' מפעילה לחץ גדול יותר מאשר קובייה א' ?

ד. אין לנו די נתונים לדעת, איזו משתי הקוביות מפעילה לחץ גדול יותר?

7) אם נקטין פי 3 את שטח המגע של גוף שמפעיל לחץ על משטח, ונרצה לשמור על אותו לחץ, נצטרך להפעיל כוח:

א. קטן פי 3.

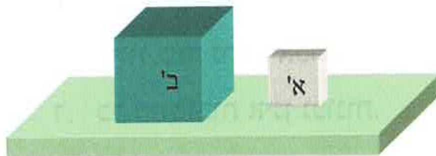
ב. גדול פי 3.

ג. אם הלחץ אינו משתנה, גם הכוח אינו צריך להשתנות.

ד. אין לנו די נתונים לדעת, כיצד הכוח צריך להשתנות

8) קובייה, שאורך צלעה 0.02m ומשקלה 1N

מונחת על הרצפה:



א. הלחץ, שהיא מפעילה, הוא 3750 פסקל.

ב. הלחץ, שהיא מפעילה, הוא 375 פסקל.

ג. הלחץ, שהיא מפעילה, הוא 37 פסקל.

ד. הלחץ, שהיא מפעילה, הוא 37500 פסקל.

דוגמה



שטח הראש של מסמר הוא $0.00006\ m^2$ ושטח החוד שלו $0.0000002\ m^2$. תלמיד מכה על ראש המסמר בכוח של 40 N.

א. מהו הלחץ שמופעל על ראש המסמר?

ב. מהו הלחץ שמופעל על הקיר?

פתרון:

א. הכוח, המופעל על ראש המסמר: $F = 40N$, ושטח המגע שלו $0.00006m^2$, לכן הלחץ הוא:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{40\ N}{0.00006\ m^2} = 666666.66\ Pa$$

ב. הכוח המופעל: $F = 40N$, שטח המגע: $A = 0.0000002\ m^2$ הלחץ הוא:

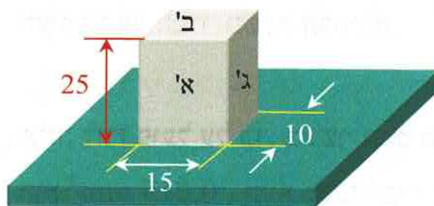
$$p = \frac{F}{A} = \frac{40\ N}{0.0000002\ m^2} = 200000000\ Pa$$



שאלות חישוב



1) באצטדיון אתלטיקה מעוניינים להציב עמוד תאורה, שמשקלו 30,000N . אם ידוע, שהלחץ, שמותר להפעיל על הקרקע, הוא 500000 Pa, מה צריך להיות שטח בסיס העמוד ?



2) נתונה תיבה שמשקלה 100 N (תרשים).
על איזו פאה תניח את התיבה, כדי שהלחץ, שהיא תפעיל, יהיה מינימאלי ?
מה יהיה לחץ זה?
(המידות הן ביחידות ס"מ)

3) משקלו של אדם 800N, שטח כף רגל אחת שלו $0.008\ m^2$.

טנק שמשקלו 400000N נע על שתי שרשראות, ששטח המגע של כל אחת מהן הוא $10\ m^2$.

א. מצאו את הלחץ, שמפעיל האדם.

ב. מצאו את הלחץ, שמפעיל הטנק .

ג. הסבירו כיצד ייתכן, שהטנק מרסק אבנים גדולות באמצעות השרשראות שלו, והאדם אינו מרסק אותן ודורך עליהן ?

4) אורכו של שולחן 1.6 m , ורוחבו- 80cm. ידוע, שמשקלו של השולחן 2000 N, והוא עומד על ארבע רגליים, שכל אחת מהן בעלת שטח מגע של $10\ cm^2$.

א. איזה לחץ מפעיל השולחן על הרצפה, כשהוא על ארבע רגליו ?

ב. אם יהפכו את השולחן, כשפניו כלפי מטה, מה יהיה הלחץ ?





5) טרקטור מפעיל על כביש לחץ של 400000 Pa. אם ידוע ששטח המגע של ארבעת גלגליו עם הכביש הוא $2000\ cm^2$, מה משקלו של הטרקטור ?



6) שטח המגע של חוד עיפרון הוא $0.15\ mm^2$. בשעת הכתיבה מפעיל עליו תלמיד כוח של 8 N. חשבו את הלחץ, שמפעיל העיפרון על הנייר בשעת הכתיבה.



7) איזה לחץ פועל על בד, כאשר חייט תופר במחט, ששטח החוד שלה הוא $0.015\ mm^2$, והוא מפעיל כוח של 4 N?



8) משקלה של מכונית הוא 6000N, ושטח המגע של כל אחד מגלגליה עם הכביש הוא $75cm^2$.

א. חשבו את הלחץ, שמפעילה המכונית על הכביש.

ב. אם ייכנסו למכונית ארבעה ילדים, שמשקל כל אחד מהם 500 N, מה יהיה הלחץ שיפעל עתה על הכביש ?

9) איזה כלי- רכב מהשלושה, המתוארים באיור, מפעיל לחץ גדול יותר על הכביש?





תשובות

1) $0.06m^2$

2) 2666.6 Pa, פאה א'

3) א. 50000 Pa, ב. 20000 Pa.

4) א. 500000 Pa ב. 1562.5 Pa

5) 80000N.

6) 53333333.33 Pa

7) 266666666.6 Pa

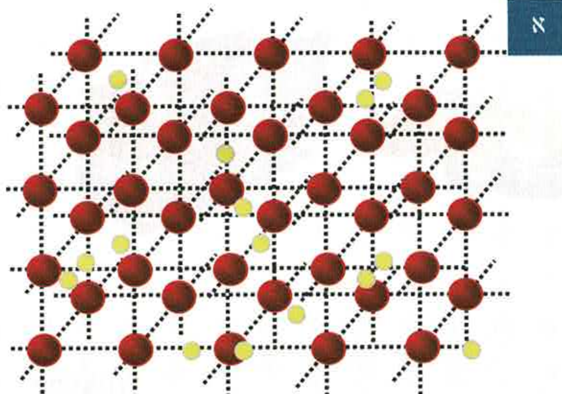
8) א. 200000 Pa ב. 266666.6 Pa

פרק כ"ב - תכונות נוזלים ולחץ בנוזלים

תכונות נוזלים

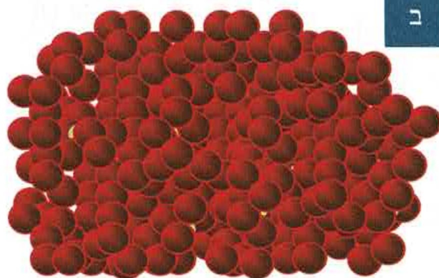
בפרק הקודם הוצג השימוש במושג **לחץ** בתיאור גופים **מוצקים**. נראה עתה, כיצד משתלב מושג זה בתיאור **זורמים, נוזלים וגזים**. תחילה נזכיר תכונות אחדות, המאפיינות את החומרים במצבי הצבירה השונים. תכונות אלו נובעות מיחסי הגומלין שבין המולקולות, המרכיבות את כל החומרים.

מצב **מוצק** מאופיין בכך, שפעולת הגומלין בין המולקולות או האטומים, המרכיבים את החומר (נכנה אותם פשוט: "חלקיקים"), יוצרים שריג (תרשים א'). מבנה זה של ארגון החלקיקים משקף את המצב, כאשר עוצמת הקשרים בין החלקיקים משתנה בעצמה עם שינוי הכיוון. למעשה, זה מעיד על כך, שלא ניתן לדמיין את החלקיקים, שיוצרים מוצק, כסוג של כדורים, שכן בכדור כל הכיוונים אינם שונים... קיום השריג גורם לכך, שגופים מוצקים מאופיינים על ידי נפח וצורה, אותם לא ניתן לשנות בקלות. נציין גם, שבנוסף לחלקיקים, היוצרים את השריג, ישנם גם חלקיקים אחרים, שנעים בתוך השריג. לכך נחזור בהמשך על מנת להסביר את קיום הזרם החשמלי בתוך חומרים מוצקים כגון מתכות.



בנוזלים לעומת זאת, ההשפעה ההדדית בין החלקיקים אינה משתנה עם הכיוון, ולכן לא נוצר שריג (תרשים ב').

את חלקיקי הנוזל ניתן לדמיין ככדורים, כמודל התומך בתכונה זו. כתוצאה מכך שומרים הנוזלים על הנפח אבל משנים את צורתם בקלות.





בגזים (תרשים ג'), הצפיפות של החלקיקים קטנה בהרבה מזו שבנוזלים ובמוצקים. הכוחות בין החלקיקים חלשים מאוד עד לרגע, בו מתרחשת התנגשות ביניהם. ברגע ההתנגשות הכוחות בין החלקיקים גדולים מאוד, וכתוצאה מההתנגשות החלקיקים משנים באופן חד את תנועתם. בכל מקרה ניתן לחשוב, שרוב הזמן חלקיקי הגזים נעים חופשית.

נסכם את הנאמר על מצבי הצבירה מבחינת המאפיינים העיקריים שלהם.

תכונות החומר	מצבי צבירה		
	מוצק	נוזל	גז
צורה חיצונית	נשמרת הצורה החיצונית. קיים שריג, ונוצרים גבישים.	הנוזלים מקבלים את צורת הכלי, ולא בהכרח ממלאים את כולו.	הגזים מקבלים את צורת הכלי, וממלאים את כולו.
נפח	נשמר	נשמר	אינו נשמר
צפיפות החלקיקים	גבוהה וקשה מאוד לשינוי	גבוהה וקשה מאוד לשינוי	נמוכה וקלה לשינוי
חופש התנועה של החלקיקים המרכיבים	החלקיקים, המרכיבים את השריג, אינם נעים. חלקיקים אחרים יכולים לנוע בתוך השריג.	החלקיקים, המרכיבים נוזלים, יכולים לנוע בכל כיוון. תנועתם מוגבלת עקב הצפיפות הגבוהה	חלקיקי הגזים נעים לכל הכיוונים כמעט ללא הפרעה מצד חלקיקי גז אחרים.

מכיון שנושא הפרק הוא נוזלים, נציין במרוכז כמה תכונות חשובות של החומר במצב זה:

א. היות ותכונות חלקיקי הנוזל אינן תלויות בכיוון, חלקיקים אלו יכולים בקלות לשנות את מיקומם ההדדי, ולכן הנוזלים מקבלים את צורת הכלי, בו הם נמצאים.

ב. הצפיפות הרבה של החלקיקים בנוזל גורמת לכך, שהפעלת לחץ חיצוני נוסף אינה גורמת להצטופפות יתר של החלקיקים, ובמידה רבה של דיוק (פרט למצב בו מופעל לחץ גבוה במיוחד) ניתן להתייחס לנוזלים כחומר, שאינו ניתן לדחיסה.

ג. את הנאמר ניתן לסכם בטענה, שהנוזלים שומרים על נפחם ללא קשר לצורת הכלי.

ד. עקב הקלות, בה משנים חלקיקי הנוזל את המצב ההדדי, פני הנוזלים בתוך הכלי נשארים אופקיים, כאשר הכלי אינו משנה את תנועתו (מהירותו נשמרת). התנהגות זו משתנה בקרבת הדפנות של הכלי, כאשר הכלים צרים במיוחד.

ה. באופן כללי ניתן לטעון, שבתוך הנוזל התכונות הפיזיקאליות אינן תלויות בכיוון (תכונת האיזוטרופיות).

ו. הנוזלים שונים במידת החיכוך, המלווה את התנועה ההדדית של חלקיקי הנוזל, או השכבות השונות של הנוזל, האחת ביחס לשנייה. חיכוך זה בנוזלים מכונה צמיגות. במים ובכוהל למשל, הצמיגות היא קטנה. בשמן או בחלב, הצמיגות היא גבוהה.

לחץ בנוזלים

בתיאור מצב של נוזל ובתיאור תופעות שבו מבדילים בין הלחץ, הקיים ללא תנועת חלקיקי הנוזל – **לחץ הידרוסטאטי**, לבין הלחץ, המופיע בנוסף ללחץ הידרוסטאטי, עקב תנועת הנוזל –**לחץ הידרודינאמי.** כאן נתעמק בתכונות הנוזל בהקשר ללחץ ההידרוסטאטי.

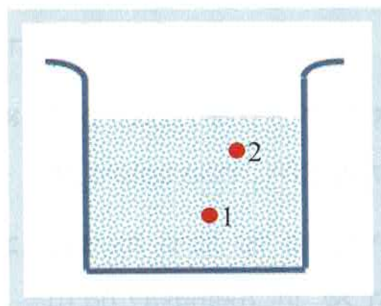


המילה **הידרו** פירושה – נוזל
המילה **סטאטי** פירושה – מצב מנוחה

בניסיון היום-יומי אנו יכולים להבחין בין שני מצבים של הנוזלים.

א. הנוזל נמצא בכלי פתוח

במצב בו הנוזל נמצא בכלי פתוח, הלחץ שבתוך הנוזל נובע ממשקלו של הנוזל ומהלחץ, שמפעיל האוויר על פני הנוזל (הלחץ האטמוספרי). קל להאמין, שבשתי נקודות בנוזל, המצויות בעומקים שונים, הלחץ יהיה גדול יותר בנקודה 1 מאשר בנקודה 2. זאת משום ששכבת הנוזל, בה נמצאת נקודה 1, תומכת בשכבת המים שמעליה ומונעת את נפילתה עקב המשיכה של כדור הארץ. זהו בעצם



המשקל של המים, שמעל לנקודה 1. שיקול דומה תקף כלפי כל הנקודות בכלי, שהן בגובה נקודה 1 לעומת הנקודות בכלי, שהן בגובה נקודה 2. פירוש התמיכה של כל שכבת נוזל בשכבות שמעליה היא עליית הלחץ בתוך הנוזל יחד עם הגדלת העומק.

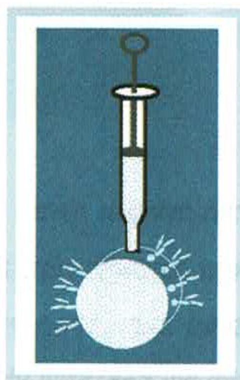
בהמשך נרחיב על תכונות הנוזל במקרה של נוזל בכלי פתוח.

ב. הנוזל נמצא בכלי סגור

צפיפותם הגבוהה של חלקיקי הנוזל ויכולתם לנוע ללא העדפת כיוון מסוים גורמת ליכולת הנוזל להעביר לחצים (פעולת כוחות) ממקום למקום. זהו מעבר בשרשרת, כאשר חלקיק נוזל מפעיל כוח על החלקיק הקרוב לו, והוא על שכנו, וחוזר חלילה.

בהדגמות הבאות נתרשם מהביטויים של תהליך מעבר הלחץ בנוזלים.

הדגמה מס' 1



ניקח מזרק המורכב מצינור ובו בוכנה. נחבר לפתח המזרק תוף בעל נקבים. נטבול את התוף במים, ונשאב מים לתוך המזרק על ידי העלאת הבוכנה. נוציא את התוף מן המים ונדחוף את הבוכנה כלפי מטה. המים יוצאים **מכל הנקבים,** למרות שהכוח, שהבוכנה הפעילה, היה רק בכיוון **מטה**.

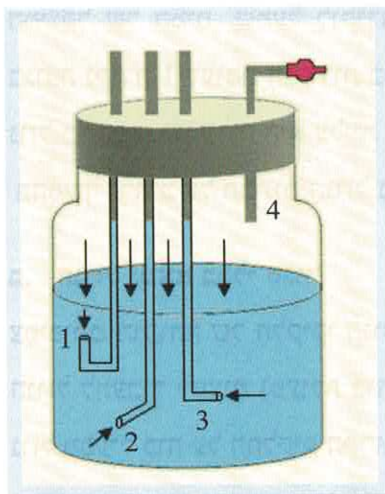
הדגמה זו מעידה על כך ,שלחץ, המופעל מבחוץ, מועבר דרך הנוזל **לכל הכיוונים** בו ולא רק בכיוון, בו הופעל הכוח החיצוני.

ניתן לראות גם, שהמים היוצאים מן הפתחים, יוצאים **בניצב** לכל פתח. מעובדה זו ניתן להסיק כי:

הלחץ בנוזלים מתפשט לכל הכיוונים

הדגמה מס' 2

ניקח צנצנת זכוכית מכוסה בפקק, דרכו עוברים מספר צינורות דקים. שלושה צינורות (1, 2, 3 בתרשים) מגיעים לעומקים שונים, ופתחיהם פונים לכיוונים שונים. צינורית 4 אינה נוגעת במים, פתחה באוויר שמעל הנוזל שבבקבוק. נחבר לצינורית 4 פומית, באמצעותה נוכל לדחוס אוויר לתוך הכלי, וכך להפעיל לחץ על הנוזל. כאשר נדחס אוויר



לתוך הכלי, נראה מיד, שהנוזל עלה בשלושת הצינורות הטבולים בו. למרות שפתחיהם של הצינורות מצויים בגבהים שונים (כבר הגענו למסקנה, שפירוש הדבר הוא, שהלחץ בפתחי הצינורות שונה), עלה מפלס הנוזל **לאותו גובה** בכל אחד מהצינורות. המסקנה מכך היא, שלחץ חיצוני, שהופעל על הנוזל, הועבר במידה שווה לכל הנקודות שבתוך הנוזל ולכל הכיוונים שבו, שכן פתחי הצינורות פונים לכיוונים שונים.

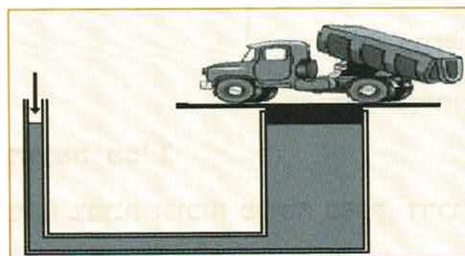


בלז פסקל
1662 – 1623

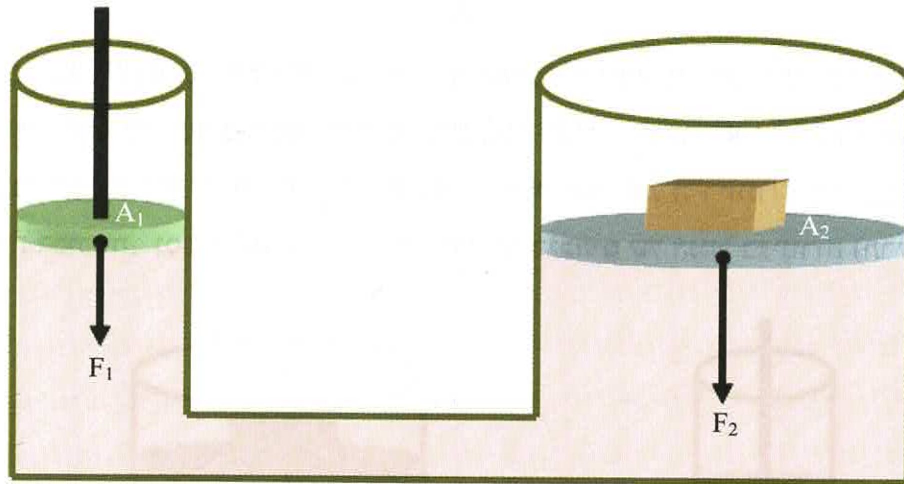
טענה זו מהווה חוק כללי, המאפיין את תכונות הזורמים (הן הנוזלים והן הגזים). חוק זה נוסח לראשונה במאה ה-17 על ידי המדען הצרפתי בלז פסקל, ולכן הוא מכונה בשם חוק פסקל. שוב נשים לב לכך, שאין החוק טוען שבכל נקודה בנוזל שורר אותו הלחץ, אלא ש**התוספת** של הלחץ **מועברת במידה שווה** לכל כיוון ולכל מקום בתוך הנוזל.

שימושים בחוק פסקל

לחוק פסקל שימושים רבים וחשובים בטכנולוגיה. **המכבש ההידראולי** מהווה דוגמא מייצגת למגוון השימושים. המכבש הוא מכשיר מכני, שבאמצעותו ניתן "להרוויח" בכוח ולהרים באמצעות כוח קטן יחסית גוף כבד מאוד. על סמך אותו עיקרון פועלים גם **מאזניים הידראוליים**, באמצעותם שוקלים גופים כבדים, שלשם כך יש להרימם, וזאת על ידי הפעלת כוחות קטנים.



נרחיב בעניין המכבש ההידראולי, שחשיבותו רבה בתעשייה, במוסכי המכוניות וכדומה. כדי להבין את עיקרון הפעולה של המכשיר, נציג אותו בצורה סמלית בלבד, ללא פרטים טכניים. באופן עקרוני **המכבש ההידראולי** מורכב משני צינורות ברוחב שונה, המחוברים ביניהם. הצינורות מכילים נוזל, בדרך כלל שמן. פתחי הצינורות סגורים על ידי בוכנות, היכולות לנוע תוך כדי שינוי הגובה.



בתרשים סימנו ב- A את שטחי הבוכנות, וב-F את הכוחות הפועלים על הבוכנות.

נראה עתה, מהו **הקשר** בין הכוחות, כאשר מערכת המכבש מאוזנת.

הפעלת הכוח על הבוכנה הקטנה יגרום להיווצרות לחץ p_1 בנוסף ללחץ הטבעי הודות למשקל השמן. גודל הלחץ הוא: $p_1 = \frac{F_1}{A_1}$

על פי **חוק פסקל**, לחץ זה יתפשט בנוזל לכל נקודה ולכל כיוון, כולל האזור, שמתחת לבוכנה השנייה. בזמן זה על הבוכנה השנייה נמצא משא, ומשקלו לוחץ על הבוכנה הגדולה.

לחץ זה גודלו: $p_2 = \frac{F_2}{A_2}$

אם המערכת מאוזנת, הלחצים p_2 ו- p_1 שווים: $p_1 = p_2$ ומכאן:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \qquad (1)$$

קשר זה בין הכוחות והשטחים מצביע על הדרך לקבלת יתרון בכוח במכבש. עם הכוח F_1 הוא הכוח, שאנו משקיעים, והכוח F_2 הוא משקל המשא, בחירת היחס בין השטחים יכולה לספק מצב, בו נקבל ריווח בכוח על פי הקשר:

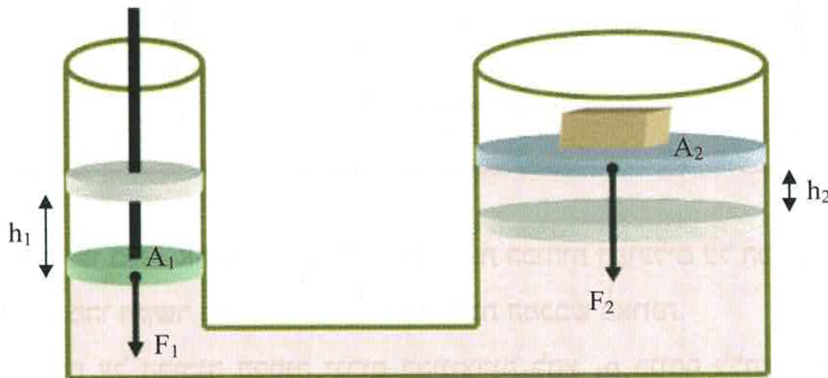
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} \qquad (2)$$



יחס זה בין הכוחות מגדיר את מה שמכונה "היתרון המכאני".

$$\frac{F_1}{F_2} \equiv \eta \qquad (3)$$

על סמך (2) אפשר להגדיל את היתרון η באמצעות היחס בין השטחים. לדוגמא: אם שטח הבוכנה, בה מניחים משא, גדול פי 10 משטח הבוכנה הקטנה, אזי הכוח המופעל על הבוכנה הקטנה קטן פי 10 ממשקל המשא. נקשר עתה את ה"ריווח" בכוח עם מידת תזוזות הבוכנות. נסמן ב-h_1 ו- ב- h_2 את השינויים **בגבהים** של הנוזל בצינורות (תרשים).



הואיל והנוזל אינו ניתן לדחיסה, הנפח הכללי שלו במכבש נשמר, כלומר, ירידת הנפח של הנוזל בצינור הקטן שווה לעליית הנפח מתחת לבוכנה הגדולה. הואיל והנפח שווה למכפלת שטח הבסיס בגובה, נקבל: $A_1 \cdot h_1 = A_2 \cdot h_2$, ומכאן:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{h_2}{h_1} \qquad (4)$$

כלומר: היחס בין שינויי הגובה **הפוך** ליחס בין השטחים. לדוגמא, אם שטח הבוכנה הגדולה גדול פי 10 משטח הבוכנה הקטנה, אזי עליית הבוכנה הגדולה היא פי 10 קטנה מירידתה של הבוכנה הגדולה. יחס זה יחד עם (2) ו- (3) מאפשר לקבל עבור היתרון המכאני:

$$\frac{F_1}{F_2}=\frac{h_2}{h_1}=\eta \qquad (5)$$

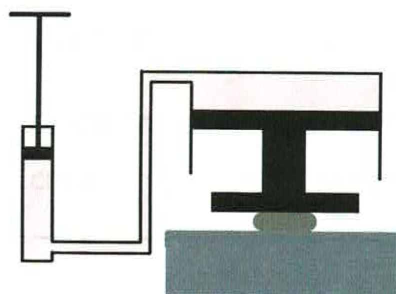
נשים לב, שהריווח בכוח מלווה בהפסד במרחק, שעוברת הבוכנה הקטנה. זהו כזכור הכלל עבור כל המכונות הפשטות (מנוף, בורג, מישור משופע, גלגלת). לכלל זה, "שמכפלת הכוח במרחק נישמר בתוך המכונה" קראנו כלל הזהב במכניקה.

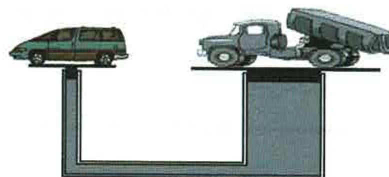


שימור מכפלת הכוח במרחק במכונה מכונה כלל הזהב של המכונות.

כידוע, מכפלת הכוח במרחק מגדירה את עבודת הכוח. אנו רואים, שכלל הזהב הוא לא יותר מהטענה, שבמכונות, כמו מכבש ההידראולי, לא ניתן להרוויח בעבודה, ויש להסתפק בריווח בכוח (גם זה לא מעט, כמובן). עובדה זו ניתן לקשר לחוק שימור האנרגיה, כפי שנעשה בחלק הקודם של הספר.

כפי שכבר ציינו, בעזרת מכבש הידראולי ניתן להפעיל כוחות גדולים למדי. משתמשים בו כדי לבצע הרמה, כפיפה, דחיסה וכד'. לאור זאת, בקביעת תנאי האיזון ניתן להזניח את משקל השמן, השונה בשתי הזרועות של המכבש.





סיכום הפרק

1. במאה ה-17 נקבע חוק פסקל, המתאר את תכונותיהם של נוזלים וגזים (זורמים).
חוק פסקל קובע: לחץ חיצוני, המופעל על נוזל, מועבר במידה שווה לכל הנקודות שבתוך הנוזל, ולכל הכיוונים שבו.

2. מכבש הידראולי נמצא באיזון, כאשר הלחצים בשני הזרועות שווים: $\frac{F_1}{A_1}=\frac{F_2}{A_2}$.

3. היחס בין הכוחות, הפועלים על בוכנות המכבש, שווה ליחס בין שטחי הבוכנות: $\frac{F_1}{F_2}=\frac{A_1}{A_2}$.

4. גדלי התזוזות של הבוכנות במכבש נמצאים ביחס הפוך לשטחן: $\frac{A_1}{A_2}=\frac{h_2}{h_1}$.

5. היחס בין הכוחות, המופעלים על המכבש, הפוך לתזוזת בוכנותיו: $\frac{F_1}{F_2}=\frac{h_2}{h_1}$.

6. מכבש הידראולי מאפשר להרוויח בכוח, או במילים אחרות, להגיע ליתרון מכני: $\eta=\frac{F_2}{F_1}>1$.

7. היתרון המכאני של המכבש ההידראולי ניתן לשינוי על ידי שינוי שטחי הבוכנות: $\eta=\frac{A_2}{A_1}$.

8. המכבש ההידראולי אינו מביא ריווח בעבודה: הריווח בכוח מלווה בהפסד בדרך בתזוזה של הבוכנה.



1) התפשטות הלחץ החיצוני בנוזל:

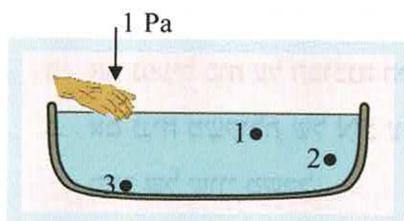
א. גורם לכך, שהלחץ יהיה שווה בכל נקודה בנוזל.

ב. גורמת לכך, שתוספת הלחץ שווה בכל חלקי הנוזל.

ג. גורמת לכך, שהלחץ יהיה שונה בכל נקודה בנוזל.

ד. אינה משפיעה על הלחץ בכל נקודה בנוזל.

2) במיכל המכיל נוזל מסוים נמדד לחץ בנקודות 1, 2, 3 (תרשים). אם יפעילו לחץ חיצוני של 1 פסקל על המיכל:



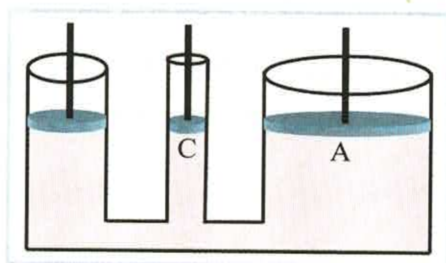
א. הלחץ בנקודות 1, 2, 3 לא ישתנה.

ב. הלחץ בנקודות 1, 2, 3 יקטן, כי הוא יתפשט לכל הכיוונים.

ג. הלחץ בנקודות 1, 2, 3 יהיה גדול יותר ב-1 פסקל מאשר בהתחלה.

ד. אין אנו יודעים מהי מידת הלחץ בנקודות 1, 2, 3.

3) שלוש הבוכנות שבשרטוט מאזנות זו את זו. שטחה של בוכנה A הוא הגדול ביותר ושטחה של בוכנה C הוא הקטן ביותר.



הלחץ הגדול ביותר נמצא תחת בוכנה:

א. A

ב. C

ג. עלינו לדעת את גודל הכוחות, הפועלים על הבוכנות.

ד. תחת שלושת הבוכנות שורר אותו לחץ.

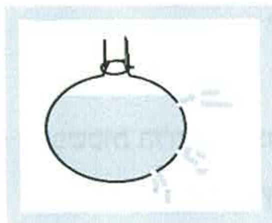
4) מכבש הידראולי יכול לגרום ל:

א. ריווח גדול בעבודה.

ב. הפסד בעבודה.

ג. לפעמים נקבל הפסד בעבודה, ולפעמים ריווח. הדבר תלוי בממדי המכבש.

ד. כל התשובות אינן נכונות.



5) נמלא שקית ניילון במים, וננקב בה שלושה חורים קטנים וזהים, כמתואר בשרטוט. אם נלחץ עליה:

א. המים ייצאו בעוצמה שונה מהחורים.

ב. המים ייצאו באותה עוצמה מכל החורים.

ג. המים ייצאו מכל החורים באופן ניצב לשקית.

ד. תשובות א' ו- ג' נכונות.

6) שטחה של הבוכנה הגדולה במכבש הידראולי גדול פי 5 מזה של הבוכנה הקטנה.

א. אם נפעיל כוח על הבוכנה הגדולה, נקבל בעזרת המכבש כוח גדול פי 5.

ב. אם נפעיל כוח על הבוכנה הקטנה, נקבל בעזרת המכבש כוח גדול פי 5.

ג. אם נניח משקולת של 5N על הבוכנה הקטנה ומשקולת של 1N על הגדולה, נקבל מצב של שווי משקל.

ד. תשובות ב' ו- ג' נכונות.

7) שטחה של הבוכנה הגדולה במכבש הידראולי גדול פי 5 מזה של הבוכנה הקטנה:

א. אם נניח משקולת על הבוכנה הקטנה, היא תרד פי 5 מאשר הבוכנה הגדולה תעלה.

ב. אם נניח משקולת על הבוכנה הגדולה, היא תרד פי 5 מאשר הבוכנה הקטנה תעלה.

ג. לא ניתן לדעת, איזו מן הבוכנות תעלה, אם לא נתון הכוח שפועל.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

8) באמצעות מכבש הידראולי:

א. ניתן לקבל ריווח בכוח.

ב. מקבלים הפסד בדרך.

ג. אין מקבלים ריווח או הפסד בעבודה.

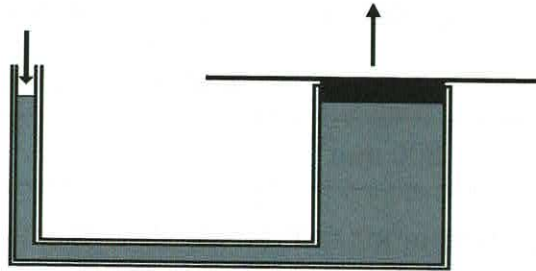
ד. כל התשובות נכונות.

דוגמה

כאשר מפעילים על הבוכנה הקטנה במכבש הידראולי כוח של 30N, יורדת הבוכנה הקטנה ב- 0.2 m. שטח הבוכנה הקטנה $0.0004\ m^2$, ושטח הבוכנה הגדולה $0.008m^2$.

א. איזה כוח יפתח המכבש?

ב. בכמה ס"מ תעלה הבוכנה הגדולה?



פתרון:

במונחים שהשתמשנו נתון הכוח, שמופעל במכבש $F_1= 30\ N$ והירידה של הבוכנה עליה הופעל הכוח: $h_1=0.2\ m$. שטח הבוכנה הקטנה: $A_1 = 0.0004\ m^2$ ושטח הבוכנה הגדולה הוא $A_2 = 0.008m^2$. יש למצוא את הכוח F_2 ואת מידת העלייה h_2 של הבוכנה הגדולה.

א. נבחר בנוסחה (1) כמתאימה לנתונים. נקבל:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{A_2}{A_1} \Rightarrow F_2 = \frac{F_1 \cdot A_2}{A_1} = \frac{30\ N \cdot 0.008\ m^2}{0.0004\ m^2} = 600\ N$$

כלומר, המכבש יפתח כוח של 600N.

ב. עתה נוכל להשתמש בנוסחה (5) או (4), כדי למצוא את מידת העלייה של הבוכנה הגדולה. נקבל:

לפי נוסחה (5) $$\frac{F_2}{F_1} = \frac{h_1}{h_2} \Rightarrow h_2 = \frac{h_1 \cdot F_1}{F_2} = \frac{0.2\ m \cdot 30\ N}{600\ N} = 0.01\ m$$

או לפי נוסחה (4): $$\frac{A_2}{A_1} = \frac{h_1}{h_2} \Rightarrow h_2 = \frac{h_1 \cdot A_1}{A_2} = \frac{0.2\ m \cdot 0.0004\ m^2}{0.008\ m^2} = 0.01\ m$$

כלומר, הבוכנה תעלה ב- 1 ס"מ.



שאלות חישוב

1) השלימו את המקומות הריקים בטבלה (שים לב ליחידות).

F_1	F_2	A_1	A_2	h_1	h_2
1500 N	6000 N	$0.0004\ m^2$		0.02m	
2000N			$0.03m^2$	6cm	0.004m
8N		$800\ mm^2$	$400\ cm^2$		0.0003m

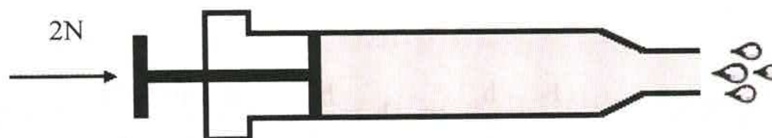
2) ידוע, ששטח הבוכנה הגדולה במכבש הידראולי הוא $0.08\ m^2$. כאשר מפעילים כוח על הבוכנה הקטנה, לחץ השמן שמתחת לבוכנה מגיע ל- 8000000Pa. מצא איזה כוח ניתן להפיק בעזרת מכבש זה.

3) שטח הבוכנה הגדולה במכבש הידראולי גדול פי 50 משטח הבוכנה הקטנה. אם ידוע,שכאשר מפעילים כוח של 40N על הבוכנה הקטנה היא יורדת ב- 0.3 m.

א. איזה כוח יפתח המכבש ?

ב. בכמה ס"מ תעלה הבוכנה הגדולה ?

4) מזרק מכיל בתוכו נוזל מסוים. כאשר מפעילים על בוכנת המזרק כוח של 2N, יוצא הנוזל מפיית המזרק (ראה תרשים). שטח בוכנת המזרק הוא $0.003m^2$, ושטח הפייה, דרכה יוצא הנוזל, הוא $8\ mm^2$. מצא מהו הכוח, שמפעילים המים, כאשר הם יוצאים מן המזרק.



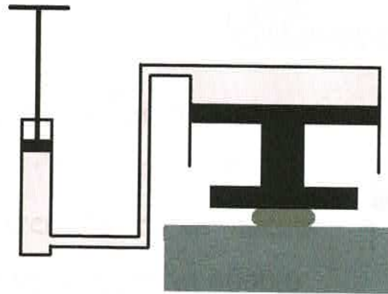
5) לאחר שהבוכנה הקטנה במכבש הידראולי ביצעה 60 מהלכים וירדה 0.18 m כל פעם, הבוכנה הגדולה, ששטחה $0.002\ m^2$, עלתה 0.3m בסה"כ. מצאו את שטחה של הבוכנה הקטנה.

6) מעוניינים להעלות את הבוכנה הגדולה של מכבש הידראולי ב- 0.5 m.

שטח הבוכנה הגדולה הוא$04m^2$, ושטח הקטנה - $0.0004\ m^2$. אם ידוע שהבוכנה הקטנה משלימה 10 מהלכים, מצא, בכמה יורדת הבוכנה הקטנה בכל פעם.

7) מעוניינים לפורר גוף מסוים, ששטחו $0.06\ m^2$, בעזרת מכבש הידראולי. אם ידוע שהלחץ הנדרש לשם כך הוא 30000000 Pa.

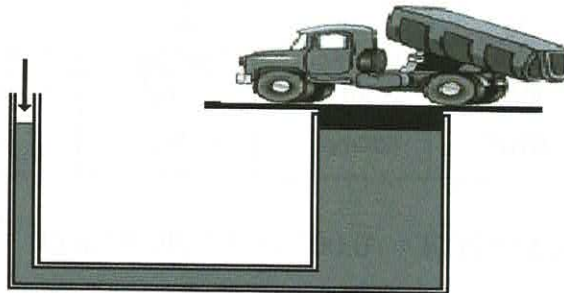
מהו גודל הכוח, שנדרש להפעיל על הבוכנה הקטנה, אם שטחה הוא $0.0005\ m^2$ שטח הבוכנה הגדולה הוא $0.08\ m^2$?



8) משאית שמסתה 2 טון עומדת על מתקן הגבהה. שטח הבוכנה הגדולה הוא $0.1m^2$, ושטח הבוכנה הקטנה הוא $0.001\ m^2$.

א. האם כוח של 190N, שיפעל על הבוכנה הקטנה, יספיק כדי להרים את המשאית?

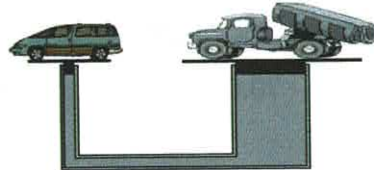
ב. אם כוח זה אינו מספיק, מה צריך להיות שטח הבוכנה הקטנה,כדי שהוא אכן יספיק ?



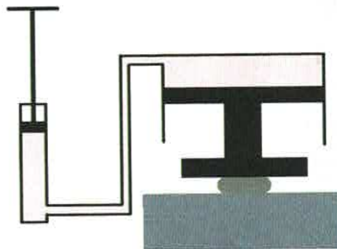
9) מכונית, שמסתה $\frac{3}{4}$ טון, מונחת על בוכנה קטנה במתקן הגבהה, ומשאית שמסתה, 3 טון, מונחת על הבוכנה הגדולה במתקן.

א. פי כמה גדול צריך להיות שטח הבוכנה הגדולה משטחה של הבוכנה הקטנה, כך שהבוכנות תהיינה מאוזנות?

ב. אם שטח הבוכנה הקטנה, $0.0008\ m^2$, מה צריך להיות שטח הבוכנה הגדולה, כדי לשמור על איזון הבוכנות?



10) מעוניינים לפורר גוף, ששטחו $0.05\ m^2$, בעזרת מכבש. הלחץ הנדרש לפורר גוף זה הוא 1000000Pa. שטח הבוכנה הגדולה של המכבש הוא $0.06\ m^2$, ושטח הבוכנה הקטנה $0.0006\ m^2$.



א. האם כוח של 400 N, הפועל על הבוכנה הקטנה, יספיק?

ב. איזו כוח מינימאלי עלינו להפעיל על הבוכנה הקטנה, כדי לפורר את הגוף?

ג. אם היינו מסתפקים בכוח של 400 N, מה היה צריך להיות אז שטח הבוכנה הגדולה?

תשובות

1)

F_1	F_2	A_1	A_2	h_1	h_2
1500N	6000N	$0.0004m^2$	$0.0016m^2$	0.02m	0.005m
2000N	30000N	$0.002m^2$	$0.03m^2$	6cm	0.004m
8N	400N	$800mm^2$	$400cm^2$	0.015 m	0.0003m

2) 640,000N **3)** א. 2,000N ב. 0.006 m **4)** 0.00533 N

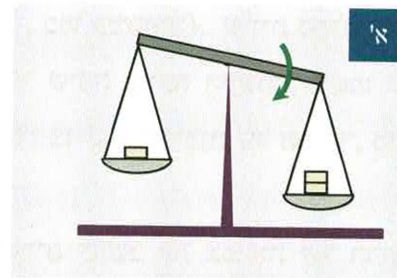
5) $0.000055m^2$ **6)** 5m **7)** 11250 N

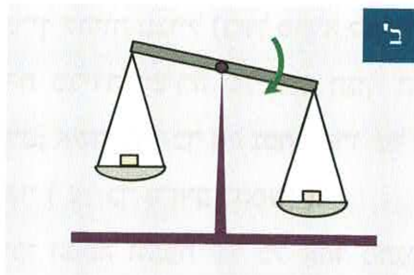
8) א. לא, נדרש כוח של 200N ב. $0.00095m^2$

9) א. פי 4. ב. $0.0032\ m^2$ **10)** א. לא יספיק. ב. 500 N ג. $0.075\ m^2$

מסה סגולית (צפיפות)

הגדרנו מסה של גוף ככמות החומר שבו. האם זהו אפיון מספק? התשובה היא חיובית כל עוד מדובר בגופים, העשויים מאותו החומר. כך למשל, אם נרכיב גוף מכמה חלקים, תהיה מסת הגוף גדולה מהמסה של כל חלק שלו. את מסת הגוף ניתן לקבוע על ידי מאזני כפות באמצעות השוואה בין הגופים, המונחים על כפות המאזניים. כך, אם הגוף המורכב משתי תיבות כולל יותר מסה מתיבה אחת. המאזנים לא יהיו באיזון ויסתובבו לכיוון הכף, עליו מונח אותו הגוף, המורכב משתי תיבות (תרשים א').





אולם, גם אם ניקח תיבות בדיוק באותן המידות, אך עשויות מחומר שונה, נוכל לראות, שהמאזניים לא תהיינה מאוזנות (תרשים ב'). איך נפרש את התוצאה? הדרך הטבעית היא להניח, שהחומר בתיבה מהסוג הראשון דחוס באופן שונה, ולכן בכל תיבה באותו נפח מצויה כמות חומר שונה.

על סמך זאת אנו מגיעים למסקנה ש:



כדי לאפיין את החומר משתמשים בצפיפות החומר: מסה הכלולה ביחידת הנפח.

צפיפות החומר היא המסה, הכלולה ביחידת נפח, המלאה בחומר זה.

נהוג להשתמש גם במונח אחר, השקול לצפיפות: **מסה סגולית.** מונח זה מדגיש, שמדובר במסה, והמידה בה החומר דחוס בחומר מסוים.

נמחיש את המושג, וניקח שלושה גופים, העשויים **מחומר זהה,** אלומיניום, למשל, אך בעלי צורה ונפח שונים זה מזה (תרשים).



באמצעות מאזני כפות נקבע את המסות של הגופים ונמדוד גם את נפחם. הדרך הפשוטה למדידת נפחם היא לטבול אותם בכלי עם מים ולמדוד את השינוי במפלס המים. הכלי צריך להיות מכויל (בעל סקלה לאורך גובה הכלי, כמו במשורה). עליית מפלס המים מאפשרת מדידה ישירה של נפח הגוף הטבול. זוהי שיטה ידועה הקשורה לשמו של ארכימדס, אשר מדד כך את נפח כתרו של המלך על ידי בדיקת הצפיפות של החומר, ממנו היה עשוי (על כך נרחיב בהמשך).

ערכי המסה והנפח של כל אחד מהגופים מאפשרים לחשב את צפיפות של החומר בהם. לשם כך נחשב את המנה $\frac{\text{מסה}}{\text{נפח}}$. נראה, שעבור שלושת הגופים נקבל אותו ערך.

במקרה שהחומר הוא אלומיניום ערך זה יהיה $2700\ \frac{kg}{m^3}$, ואם היה זה ברזל, היינו מקבלים ערך אחר השווה ל- $7800\ \frac{kg}{m^3}$.

כל חומר מאופיין אל ידי הצפיפות שלו (המסה הסגולית).



ובאופן סימבולי, אם נסמן ב- m את מסת הגוף וב- V את נפחו, נקבל עבור המסה הסגולית, או הצפיפות, ρ, את הביטוי המתמטי:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (1)$$

נוסחה זו קובעת גם את יחידות הצפיפות. אם מודדים את המסה בקילוגרם ואת הנפח במטר מעוקב (בשלישית), נקבל עבור מימד הצפיפות:

$$[\rho]=\frac{kg}{m^3}$$

יחידה אחרת, גם היא שימושית, מתקבלת, אם מודדים את המסה בגרמים ואת הנפח בסנטימטרים מעוקב (בשלישית). אז נקבל עבור מימד הצפיפות:

$$[\rho]=\frac{gr}{cm^3}$$

לדוגמה, קוביית כסף, שניפחה 1 סמ"ק, מכילה 10.5 גרם, לכן מסתו הסגולית של הכסף היא $10.5\frac{gr}{cm^3}$. או לחלופין, בקוביית כסף שנפחה $1m^3$ אחד מטר מעוקב, מצויה כמות חומר של 10,500 קילוגרם. מסתו הסגולית של הכסף בבחירה זו של יחידות היא $10500\frac{kg}{m^3}$.

במציאות ניתן לקבוע את סוג החומר, ממנו עשוי גוף, על ידי חישוב המסה הסגולית שלו והשוואתה עם ערכי הצפיפויות של חומרים שונים, כפי שהם מופיעים בספרי ייחוס. הנה מספר דוגמאות:



לסיכום, ידיעת המסה הסגולית מאפשרת:

א. זיהוי חומרים על- פי צפיפותם.

ב. קביעת כמות הנוזל על פי צפיפותו ונפחו, וקביעת נפחו של נוזל על- פי צפיפותו ומסתו.

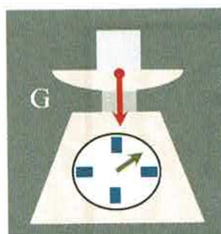
ג. קביעת כוח העילוי, המופעל על גופים טבולים בנוזלים. על כך נרחיב בהמשך.

טבלת צפיפויות של נוזלים שונים

(ביחידות kg/m^3)

נוזלים		מוצקים	
בנזין	700	קרח	900
כוהל	790 - 800	אלומיניום	2700
נפט	800	ברזל	7800
שמן	800 - 900	נחושת	8900
מים	1000	כסף	10500
דם	1050	זהב	19300
כספית	13600	פלטינה	21500

המשקל הסגולי



כידוע, קיום המסה גורם לכוח הכובד, המופעל על הגופים וגורם לקיומו של המשקל- הכוח המופעל על התמיכה ומונע מהגופים את נפילתם. המשקל נמדד באמצעות מאזני קפיץ (ראה תרשים). הואיל והמשקל קשור לגודל המסה בקשר ישיר, ניתן להגדיר במקביל **למסה הסגולית** את **המשקל הסגולי**, שיאפיין כל חומר נתון. כמו במקרה של המסה, המשקל מאפיין גוף שלם, וכל חומר מאופיין על ידי המשקל הסגולי שלו.

נזכיר רק, שלעומת המסה, המשקלים משתנים בהתאם למצב השקילה ולמיקום, בו מתבצעת המדידה על פני כדור- הארץ.



בדומה למסה הסגולית מגדירים את **המשקל הסגולי**, d, כיחס שבין משקל של הגוף, G, ונפח הגוף, V, כלומר הביטוי המתמטי עבור המשקל הסגולי הוא:

$$d = \frac{G}{V} \qquad (2)$$

זהו משקל יחידת נפח, המכילה חומר מסוים, כאשר היא נמצאת במנוחה. נוסחה (2) קובעת יחידות למדידה של משקל סגולי. את המשקל מודדים בניוטון, ואת הנפח – במטרים מעוקבים תהיה היחידה של המשקל הסגולי.

$$[d] = \frac{N}{m^3}$$

כפי שכבר ציינו, למרות שהשינוי במשקל – במנוחה במקומות גיאוגרפיים שונים על פני כדור- הארץ הוא קטן (כ-3%, במקרים הקיצוניים של הקוטב לעומת קו המשווה), כדאי לזכור את קיום השינויים, כאשר מדובר במעבר סחורות או במשימות טכנולוגיות שונות (כגון המראת מטוסים ושיגור טילים לחלל).

נציין גם, שלמרות שהמסה היא סגולה של הגוף ולא המשקל, נפוץ השימוש במשקל הסגולי כאחד המאפיינים של החומר. במקרה זה הכוונה, כמובן, למדידת המשקל במצב מנוחה. נזכור זאת בפרקים הבאים, כאשר נשתמש במושג משקל סגולי בהידרוסטאטיקה. ההבדל בין מסה סגולית לבין משקל סגולי הוא, למעשה, ההבדל בין מסה למשקל: המשקל הוא כוח, ויש לו כיוון. המסה היא גודל, המאופיין רק על ידי מספר, ואין לו כיוון. המשקל תלוי בתנאי התנועה (תאוצת הגוף, נפילה וכדומה,) בהם נמצא הגוף, והמסה היא סגולה של הגוף, הקובע שינוי במצב תנועתו, כאשר מופעל עליו כוח. מסה קובעת גם את גודל כוח הכובד, הפועל על הגוף, ואת גודל כוח הכובד, שהגוף מפעיל על הגופים האחרים.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1) משקל סגולי הוא:

א. כמות החומר שיש בנפח של 1 סמ"ק

ב. משקל החומר בנפח כלשהו.

ג. כמות החומר בנפח כלשהו.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

2) אחד ההבדלים בין מסה סגולית לבין משקל סגולי הוא:

א. המסה הסגולית משתנה בהתאם למקום, והמשקל הסגולי לא.

ב. המשקל הסגולי משתנה בהתאם לתנאי המדידה, והמסה הסגולית לא.

ג. המסה הסגולית שווה עבור כל החומרים, והמשקל הסגולי שונה מחומר לחומר.

ד. אין כל הבדל ביניהם.

3) בידך נמצאת אבן סלע בעלת צורה, שאינה מוגדרת (תרשים). אם נרצה למצוא את מסתה הסגולית של האבן מבלי להרוס אותה:



א. לא נוכל לדעת את מסתה הסגולית בשל צורתה.

ב. אפשר למצוא את מסתה הסגולית של האבן במדויק.

ג. נוכל להעריך בקירוב, מה מסתה הסגולית של האבן.

ד. תלוי באיזה מקום נמצאת האבן.

4) כאשר נמזוג שני נוזלים בעלי מסה זהה לשני כלים שונים, נקבל ש:

א. הנוזל בעל הצפיפות הקטנה יותר יתפוס יותר נפח.

ב. הנוזל בעל הצפיפות הגדולה יותר יתפוס יותר נפח.

ג. שניהם יתפסו אותו נפח.

ד. בהתאם לצורת הכלים, נדע איזה נוזל יתפוס יותר נפח.

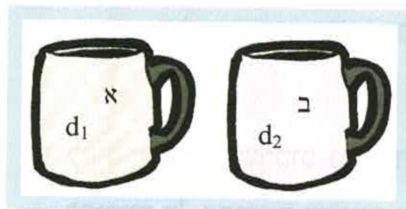
5) נתונים שני בקבוקים זהים. לתוך בקבוק אחד מוזגים מים, ולבקבוק השני – חלב.
אם משקלו הסגולי של המים קטן מזה של החלב, איזה בקבוק ישקול יותר ?

א. הבקבוק עם המים.

ב. הבקבוק עם החלב.

ג. לשניהם משקל זהה.

ד. לא ניתן לדעת.



6) לשתי כוסות זהות מוזגים משקל שווה של נוזלים שונים. בכוס א' נמצא, נוזל שמשקלו הסגולי גדול מהנוזל שבכוס ב' ($d_1>d_2$). באיזו כוס יגיע הנוזל לגובה רב יותר?

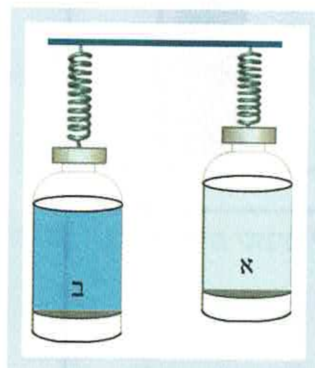
א. בכוס א'

ב. בכוס ב'

ג. כדי לענות על השאלה, עלינו לדעת את משקלם הסגולי של הנוזלים.

ד. בשתי הכוסות יגיע הנוזל לאותו גובה, כי המשקל זהה.

7) שני בקבוקים זהים תלויים על קפיצים זהים. בכל בקבוק יש נוזל, שנפחו זהה לנפח הנוזל שבבקבוק האחר (השרטוט מראה את מצב הקפיצים).



א. משקלו הסגולי של הנוזל בבקבוק א' גדול יותר ממשקלו הסגולי של הנוזל בבקבוק ב'.

ב. משקלו הסגולי של הנוזל בבקבוק ב' גדול יותר מזה שבבקבוק א'.

ג. לא ניתן לדעת, איזה נוזל בעל משקל סגולי גדול יותר, כי לא ידוע משקל הנוזלים.

ד. המשקל הסגולי של שני הנוזלים זהה, כי יש להם נפח זהה.

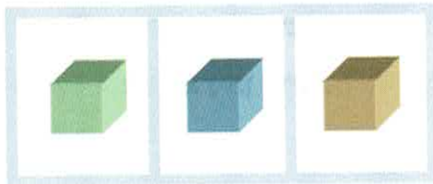
8) לשלוש קוביות, העשויות מחומרים שונים, נפח זהה של 1 סמ"ק. עובדה זו מצביעה על כך ש:

א. המשקל של שלוש הקוביות זהה.

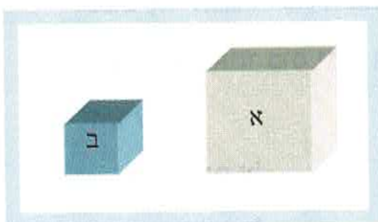
ב. המשקל הסגולי של שלוש הקוביות זהה.

ג. המסה הסגולית של שלוש הקוביות זהה.

ד. כל התשובות אינן נכונות.



9) לקובייה א' שבשרטוט נפח גדול פי 4 מאשר לקובייה ב'. הקוביות עשויות מחומרים שונים. האם נכון ש:



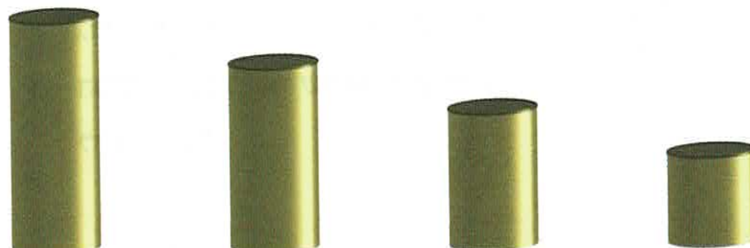
א. משקלה הסגולי של קובייה א' גדול פי 4 ממשקלה הסגולי של קובייה ב' ?

ב. משקלה הסגולי של קובייה ב' גדול פי 4 ממשקלה הסגולי של קובייה א' ?

ג. ייתכן שלשתי הקוביות משקל זהה ?

ד. כל התשובות אינן נכונות ?





דוגמה

ערבבו $0.0001m^3$ שמן, שצפיפותו $900\frac{kg}{m^3}$, עם $0.00005m^3$ גליצרין, שצפיפותו $1200\frac{kg}{m^3}$. מהי צפיפות התערובת?

פתרון:

שמן	גליצרין	תערובת	
$V_1 = 0.0001m^3$	$V_2 = 0.00005\ m^3$	$V = ?$	
$\rho_1 = 900\frac{kg}{m^3}$	$\rho_2 = 1200\frac{kg}{m^3}$	$\rho = ?$	
$G_1 = ?$	$G_2 = ?$	$G = ?$	

נפח התערובת הוא סכום הנפחים של השמן ושל הגליצרין:

$$V_{\text{תערובת}} = V_{\text{גליצרין}} + V_{\text{שמן}} = 0.00005\ m^3 + 0.0001m^3 = 0.00015\ m^3$$

המסה הכללית של התערובת היא מסת השמן יחד עם מסת הגליצרין.

נחשב את מסת השמן:

$$m_1 = V_1 \cdot \rho_1 = 0.0001\ m^3 \cdot 900\ \frac{kg}{m^3} = 0.09\ kg \quad \text{שמן}$$

נחשב את מסת הגליצרין:

$$m_2 = V_2 \cdot \rho_2 = 0.00005\ m^3 \cdot 1200\ \frac{kg}{m^3} = 0.06\ kg \quad \text{גליצרין}$$

המשקל הכללי: $m_{\text{תערובת}} = m_{\text{שמן}} + m_{\text{גליצרין}} = 0.09kg + 0.06kg = 0.15kg$

נחשב את צפיפות התערובת:

$$\rho_{\text{תערובת}} = \frac{m_{\text{תערובת}}}{V_{\text{תערובת}}} = \frac{0.15\ kg}{0.00015\ m^3} = 1000\frac{kg}{m^3}$$

צפיפות התערובת היא: $1000\frac{kg}{m^3}$ (כמו של מים).



שאלות חישוב

1) לתוך כלי זכוכית, שאורכו 0.5m ורוחבו 0.3m, יוצקים נפט, שצפיפותו $800\frac{kg}{m^3}$.

הנפט מגיע לגובה של 0.2 m. מהי מסת הנפט, הנמצא בתוך הכלי ?




2) גוש זהב, שצפיפותו $19300\frac{kg}{m^3}$ מסתו היא 2kg.

מהי מסת גוש כסף, שצפיפותו $10500\frac{kg}{m^3}$, אם

גוש הכסף בעל נפח זהה לזה של גוש הזהב?

3) כלי, כשהוא מלא, מכיל מים, מסתו 10kg, וכשהוא ריק מסתו 2kg. אם הצפיפות של

המים היא $1000\frac{kg}{m^3}$, מה נפחו הפנימי של הכלי ?

4) ניקח בקבוק ונמלא אותו במים, שצפיפותם $1000\frac{kg}{m^3}$. אם נמדוד את מסת הבקבוק,

פעם אחת כשהוא מלא מים ופעם שנייה כשהוא מלא בחלב, נמצא, שכאשר הוא מלא

בחלב מסתו קטנה ב- 0.1kg. אם ידוע, שצפיפות החלב היא $1030\frac{kg}{m^3}$, מהו נפחו

הפנימי של הבקבוק?

5) מערבבים $0.0003m^3$ נפט, שצפיפותו $800\frac{kg}{m^3}$, עם $0.0001m^3$ מים, שצפיפותם

$1000\frac{kg}{m^3}$.

מה תהיה צפיפות התערובת?



6) מסתו של כדור, העשוי כסף, שצפיפותו $10500\frac{kg}{m^3}$, היא 1kg. אם ידוע, שנפחו של הכדור $0.0004\ m^3$, האם הכדור מלא או חלול ?

7) משקלו של בקבוק ריק הוא 3kg. ממלאים את הבקבוק במים,שצפיפותם $1000\frac{kg}{m^3}$, ועתה מסתו של הבקבוק היא 15kg. כאשר ממלאים את הבקבוק בשמן (לאחר שמרוקנים את המים), משקלו של הבקבוק הוא 14kg. מהי צפיפותו של השמן?

8) לתוך ארגז, שאורכו 0.75m ורוחבו 0.2 m, שופכים 450kg חול, שצפיפותו $1500\frac{kg}{m^3}$. לאיזה גובה יגיע החול בארגז?

9) נתונות שתי כוסות זהות לחלוטין, ששטח הבסיס שלהן $0.003m^2$. לכוס אחת מוזגים מים, שצפיפותם $1000\frac{kg}{m^3}$, ולכוס שנייה בנזין, ש צפיפותו $700\ \frac{kg}{m^3}$. אם ידוע, שמסת המים שבכוס הראשונה היא 2kg, והיא שווה למסת הבנזין שבכוס השנייה,מה הפרש הגבהים בין שני הנוזלים שבכוסות?

10) משקל מסג של זהב וכסף הוא 1kg. צפיפות המסג כולו היא $15400\ \frac{kg}{m^3}$. אם ידוע, שצפיפות הזהב היא $19300\ \frac{kg}{m^3}$, ושל הכסף היא $10500\frac{kg}{m^3}$, מהו מסת הזהב ומהו מסת הכסף שבמסג?

תשובות

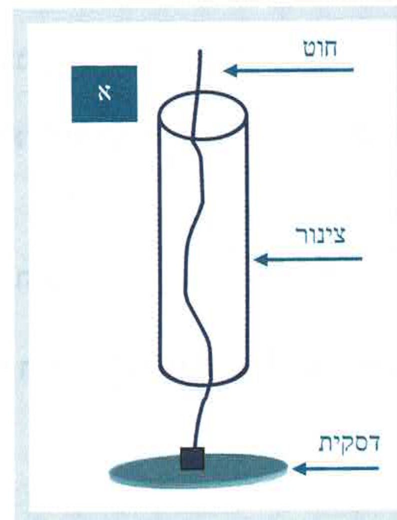
1) 24kg **2)** 1.088kg **4)** $0.008\ m^3$ **5)** $850kg/m^3$ **6)** חלול.

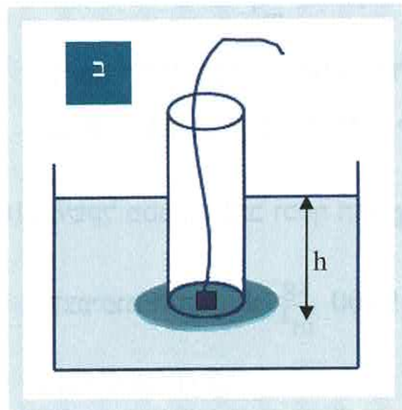
7) $916.6kg/m^3$ **8)** 2m **9)** 0.285m **10)** כ – 0.7 kg זהב, כ- 0.3 kg כסף.

כאמור, בכל נקודה בתוך נוזל, המצוי בכלי נייח ופתוח, שורר **לחץ** עקב משקלו העצמי של הנוזל. הכרנו גם תכונה חשובה של נוזלים: הלחץ בנקודה כלשהי בתוך הנוזל אינו תלוי בכיוון (חוק פסקל). עתה נברר, באילו גורמים בדיוק תלוי לחץ זה. לשם כך נבצע הדגמה.

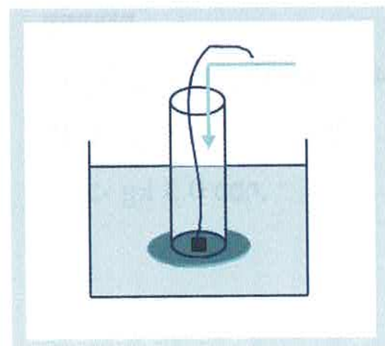
הדגמה מס' 1

ניקח צינור זכוכית, הפתוח משני צידיו, ודיסק, שקוטרו גדול מקוטר הצינור. נקשור את הדיסק בחוט, ונעביר אותו דרך הצינור (תרשים א'). אם נשחרר את החוט ונחזיק את הצינור, ייפול הדיסק נפילה חופשית. עתה נצמיד את הדיסק אל הצינור על ידי משיכה של החוט, ונטבול אותם ביחד בכלי עם מים (תרשים ב'). הפעם גם אם נשחרר את החוט, הדיסק לא ייפול, אלא יישאר צמוד אל הצינור (וכך גם ימנע מן המים מלהיכנס לתוך הצינור).





עובדה זו מעידה על קיום **כוח הפועל מצד הנוזל** על הדיסק, המכוון כלפי מעלה, ומצמיד את הדיסק אל הצינור. כוח זה מופעל על ידי המים, ומכונה כוח הידרוסטאטי.



נוכל לדעת, מהו גודלו של הכוח ההידרוסטאטי, אם נדע, מהו הכוח הנדרש להפעיל על הדיסק, מהצד

ההפוך של הדסקית, על מנת לנטרל את הכוח ולנתק את הדסקית מהצינור. לשם כך נמזוג (באיטיות) מים לתוך הצינור. נראה שהדסקית תנתק מן הצינור, ברגע שמפל הנוזל בתוך הצינור יגיע לגובה הנוזל שבכלי. (משקלו של הדיסק עצמו הוא זניח לעומת משקל המים שבתוך הצינור).

מהדגמה זו נוכל להסיק:

משקל המים בתוך הצינור שווה לכוח, שהמים שבכלי מפעילים על הדסקית **כלפי מעלה**

משקלו של הנוזל, שנמצא בתוך הצינור G, ניתן לחישוב על סמך ידיעת המשקל הסגולי של הנוזל d, והנפח של הנוזל V. כפי שהגדרנו:

$$G = V \cdot d$$

נפרט גם את נפח הנוזל על סמך היחס הידוע של הנפח V עם שטח החתך של הצינור A וגובה עמוד המים בתוך הכלי h:

$$V = A \cdot h$$

עתה נקבל עבור משקל המים בתוך הצינור

$$G = A \cdot h \cdot d$$

כאמור, זהו גם גודלו של הכוח ההידרוסטאטי, אותו נסמן ב-F. כלומר:

$$F = A \cdot h \cdot d$$

הואיל והלחץ שווה לכוח, הפועל על יחידת שטח, נמצא את גודל הלחץ ההידרוסטאטי:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{A \cdot h \cdot d}{A}$$

$$p = h \cdot d \qquad (1)$$

ביטוי זה מכונה בשם **חוק הלחץ ההידרוסטאטי**, אותו ניתן לבטא באופן הבא:

הלחץ, השורר בנקודה מסוימת בתוך הנוזל, נמצא ביחס ישר למשקל הסגולי של הנוזל ולעומק נקודה זו.

כלומר, בנוסף לכך, שהלחץ ההידרוסטאטי אינו תלוי בכיוון (חוק פסקל), אנו יודעים גם, למה הוא שווה. החוק טוען, שלחצים בנקודות ,הנמצאות באותו עומק, הם שווים.

בקביעת תוצאה זו התייחסנו רק למשקל העצמי של הנוזל. אם ניקח בחשבון את העובדה, שעל פני הנוזל קיים לחץ אטמוספרי, אותו נסמן ב- p_0, נצטרך להוסיף לחץ זה לגודל הלחץ, הקיים בכל נקודה ונקודה בנוזל. מכאן נקבל, שהביטוי עבור הלחץ בנקודה כלשהי בתוך הנוזל הוא:

$$p = p_0 + h \cdot d \qquad (2)$$

את הקשר (1) ניתן לבטא באמצעות צפיפות הנוזל. כזכור, הקשר בין המשקל למסה נתון בביטוי: $G = m \cdot g$, והקשר בין המסה לצפיפות נתון בביטוי: $\rho = \frac{m}{V}$, מכאן:

$$G = V \cdot d = \frac{m}{\rho} \cdot d \Rightarrow m \cdot g = \frac{m}{\rho} \cdot d \Rightarrow d = \rho \cdot g$$

נציב את הביטוי עבור המשקל הסגולי ב (1), ונקבל:

$$P = h \cdot \rho \cdot g$$

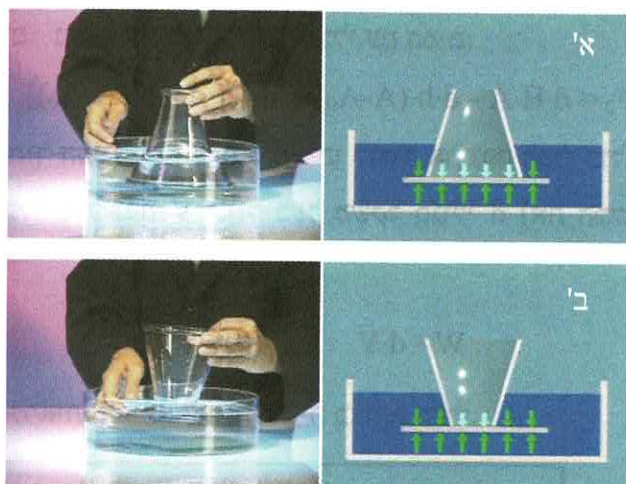
הפרדוכס ההידרוסטאטי

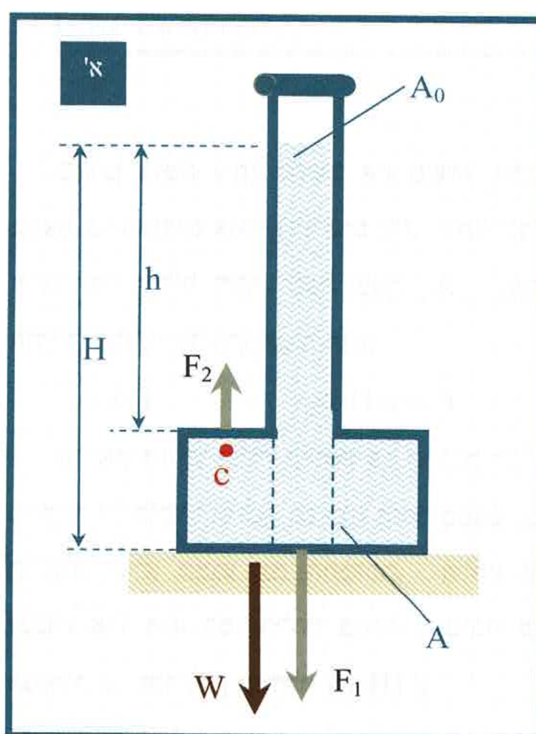
ראינו שהלחץ ההידרוסטאטי, השורר בתוך הנוזל, תלוי רק בעומק המקום, הנמצא מתחת למפלס הנוזל ובמשקל הסגולי שלו (נזניח את הלחץ החיצוני של האטמוספרה). באותו זמן **הכוח** ההידרוסטאטי, המופעל מצד הנוזל על קרקעית הכלי, המכיל את הנוזל, תלוי, בנוסף, גם בגודל שטח הקרקעית:

$$F_{hs} = A \cdot h \cdot d \qquad (2)$$

במבט ראשון יכול להיווצר הרושם שאנו יכולים לשנות בקלות את משקל הנוזל בתוך הכלי. לשם כך למשל, די לשים את הנוזל בתוך כלי רחב מלמטה וצר מלמעלה (תרשים א'), ואחרי כן ניקח כלי אחר, גם הוא פתוח מלמעלה, אלא שצורתו הפוכה, כלומר: רחב מלמעלה וצר מלמטה (תרשים ב'). במילים אחרות, מפתה לחשוב, שניתן ליצור לחץ גבוה p על ידי מעט נוזל, בכלי הצר בחלקו העליון (תרשים א'), וכוח הידרוסטאטי גדול על ידי הרחבת הכלי מלמטה (בסיס רחב A), כך, הכוח התלוי במכפלה (נוסחה 2) יעלה! אם נהפוך את הכלי הזה (תרשים ב'), הכוח ההידרוסטאטי יקטן, וכך ישתנה המשקל. תוצאה זו הייתה מוזרה, ולכן קיבלה את השם: **"הפרדוקס ההידרוסטאטי"**. ואכן מתברר, שהשיקול, שהצגנו כאן הוא מוטעה, וכמובן, לא ניתן לשנות את המשקל רק על ידי סיבוב הכלי...

נסביר את הפרדוקס:





ניקח כלי, המורכב משני גלילים בקוטר שונה. נסמן את השטחים ב-A ו-A_0, כפי שמצוין בתרשימים.

במקרה הראשון (תרשים א'), הכוח ההידרוסטאטי על הקרקעית נקבע על ידי עמוד הנוזל בגובה H ושטח בסיס A (הקוטר של הגליל הרחב). כוח זה שווה ל- $d{\cdot}H{\cdot}A$. בסך הכול פועל על הקרקעית כוח:

$$F_1 = d{\cdot}H{\cdot}A \qquad (3)$$

אולם זה אינו הכוח, בו לוחץ הכלי על התמיכה (המשקל של הכלי עם הנוזל). לא לקחנו בחשבון, שהנוזל מפעיל כוח הידרוסטאטי גם על הדפנות העליונות, כמו בסביבת הנקודה c שבתרשים. הלחץ בעומק זה, הנמצא בסביבת הנקודה c, שווה ל- $d{\cdot}h$. השטח, עליו הופעל הלחץ הוא $(A-A_0)$.
לכן הכוח F_2, שכיוונו כלפי מעלה, הוא:

$$F_2=d\cdot h\cdot(A-A_0) \qquad (4)$$

כוח זה, כאמור, הופעל על הכלי, ולכן בחישוב הכוח, בו לוחץ הכלי על תמיכה, כלומר המשקל של הכלי והנוזל, יש לקחת בחשבון את שני הכוחות, ואת העובדה, שהם פועלים בכיוונים הפוכים. נחשב את המשקל של הכלי עם המים:

$$W_a= F_1 - F_2 = d\cdot H\cdot A - d\cdot h\cdot(A-A_0) = d\cdot[H\cdot A - h\cdot(A-A_0)] \qquad (5)$$

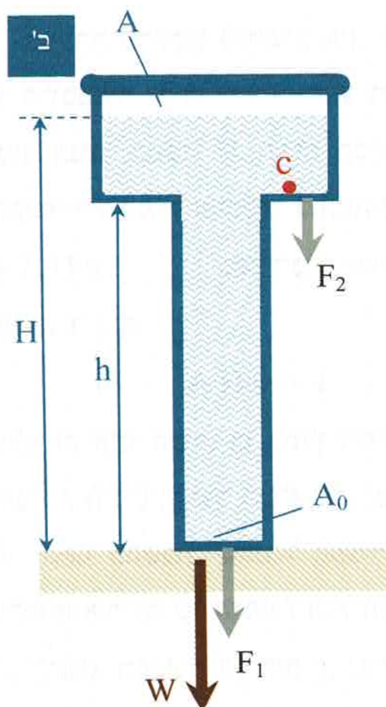
בביטוי שבתוך הסוגריים המרובעים ניתן לזהות את נפח הכלי כולו, ולכן קיבלנו עבור המשקל של הכלי בעל נפח V ונוזל בעל משקל סגולי d (את המשקל של הכלי עצמו הזנחנו):

$$W= d\cdot V \qquad (6)$$

כפי שניתן לראות, התוצאה אינה תלויה בצורת הכלי.



בניגוד לכוח ההידרוסטאטי, הפועל על קרקעית הכלי, ואשר תלוי בצורת הכלי, משקל הכלי עם הנוזל אינו תלוי בצורת הכלי.



באופן דומה ניתן לחשב את משקל הכלי, במצב בו הופכים אותו (תרשים ב'). עתה הכלי עומד על הגליל הצר, בעל שטח A_0. הכוח ההידרוסטאטי על הקרקעית הוא:

$$F_1= d\cdot H\cdot A_0 \qquad (7)$$

אך אין זה כל הכוח הלוחץ על תמיכת הכלי. במקרה זה הופעל בנוסף גם כוח הידרוסטאטי על הדפנות שלא במגע עם התמיכה. הלחץ על דפנות אלו הוא כמו הלחץ בנוזל בסביבה של הנקודה c. זהו לחץ שגדלו: $d\cdot(H-h)$.

השטח, עליו הופעל הלחץ, הוא $(A-A_0)$.

לכן הכוח ההידרוסטאטי הנוסף הוא:

$$F_2= d\cdot(H-h)\cdot(A-A_0) \qquad (8)$$

הואיל והפעם שני הכוחות ההידרוסטאטיים פועלים באותו כיוון, משקל הכלי במקרה של תרשים ב' הוא:

$$W_b= F_1 + F_2 = d\cdot H\cdot A_0 + d\cdot(H-h)\cdot(A-A_0) = d\cdot[H\cdot A_0 + (H-h)\cdot A] \qquad (9)$$

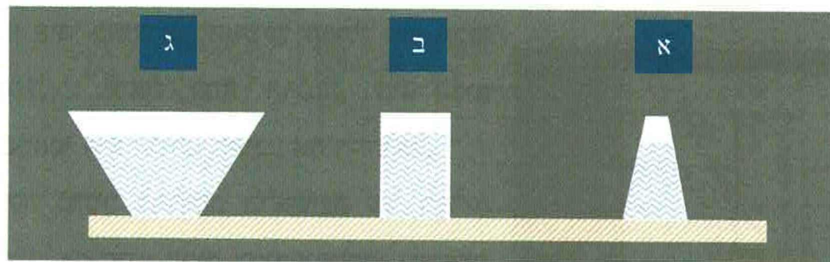
גם הפעם ניתן לזהות בביטוי שבתוך הסוגריים המרובעים את הביטוי עבור נפח הכלי. שוב קיבלנו, שמשקל הכלי עם המים הוא:

$$W_a= W_b= d\cdot V \qquad (10)$$

בדיוק כפי שקיבלנו במקרה הקודם.

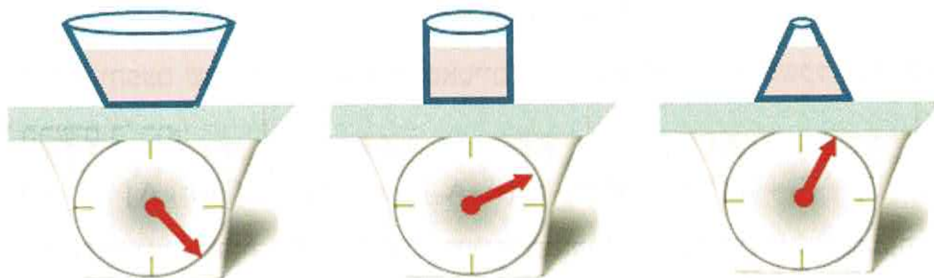
איששנו אם כן את המסקנה, שהסקנו גם עבור המקרה, בו הכוח ההידרוסטאטי על הקרקעית, הנמצא במגע עם התמיכה, הוא קטן יותר מהמשקל הכללי. גם הפעם לא קיים שום פרדוקס.

ניתן להציג את הפרדוקס גם באופן אחר: ניקח שלושה כלים בעלי צורה שונה אך בעלי שטח בסיס שווה, כפי שמתואר בתרשים.



בתוך שלושת הכלים מפלס הנוזל מצוי באותו הגובה. נוסחת הלחץ ההידרוסטאטי (2) קובעת, שאותו לחץ שורר ליד הקרקעית בשלושת הכלים, וגם הכוח ההידרוסטאטי יהיה שווה, כי שטחי הבסיס שווים. על פני הדברים קיבלנו פרדוקס, כי כמות הנוזל שונה בכל כלי, והכוח ההידרוסטאטי על הקרקעית זהה בכל כלי. כפי שהראנו למעלה, משקל הכלי עם המים אינו שווה לכוח ההידרוסטאטי, המופעל על הקרקעית. חשבון מדויק כולל גם את תרומת לחץ הנוזל על הדפנות, וסיכום כל הכוחות ההידרוסטאטיים על דפנות הכלי נותן את משקל הכלי (הדגמו זאת עבור כלי בעל צורה פשוטה).

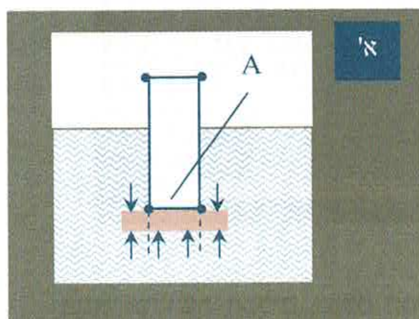
משקל זה יהיה שונה עבור כל אחד משלושת הכלים. אפשר כמובן להיווכח בכך גם על ידי שקילה ישירה (ראו תרשים).



שלושת הכלים הם פתוחים. הם בעלי שטח בסיס זהה, והם מכילים אותו סוג של נוזל בגובה זהה. למרות שהכוחות, הפועלים על קרקעית הכלי מצד הנוזל, זהים בשלושת הכלים, משקלם הוא שונה.

חשיבות הכוח ההידרוסטאטי

מתוך ההדגמות האחרונות והפרכת הפרדוקס ההידרוסטאטי יכול להיווצר הרושם המוטעה, שהכוח ההידרוסטאטי אינו חשוב ואינו משפיע. זו אינה מסקנה נכונה. כל מה שראינו הוא, שכוח זה אינו קובע את המשקל הכולל של הכלי עם הנוזל. נראה עתה הדגמה, בה הכוח ההידרוסטאטי הוא הגורם הקובע את התוצאה.



תחילה נחזור להדגמה הראשונה של הפרק, ובה הראינו את קיום הכוח ההידרוסטאטי (תרשים א'). עקב קיום כוח זה נצמדה הלוחית אל הצינור. עתה לא נזניח את משקלה העצמי של הלוחית, W.

עקב קיומו של הלחץ ההידרוסטאטי על הלוחית הופעל כוח הידרוסטאטי. כוח זה פעל על כל השטח התחתון A של הלוחית, וגם על חלק מהשטח העליון, אשר מצוי מחוץ לצינור. הכוח ההידרוסטאטי F_{HS} על התחתית הופעל עקב קיום לחץ הידרוסטאטי בתוך הנוזל, והוא מכוון כלפי מעלה. הכוח שווה:

$$F_{HS}(\text{כלפי מעלה}) = p_1 \cdot A \qquad (11)$$

על חלק מהשטח העליון של הלוחית פעל כוח הידרוסטאטי גם כן. גודלו נקבע על ידי הלחץ במקום, p_2, והשטח, שהוא הפרש בין שטח הלוחית, A ושטח הצינור, A_0. כוח זה מכוון כלפי מטה:

$$F_{HS}(\text{כלפי מטה})= p_2\cdot(A-A_0) \qquad (12)$$

הואיל והלחץ בתוך הנוזל משתנה עם העומק והלוחית היא דקה, ניתן להתייחס ללחצים מעל ומתחת ללוחית, המוקפת מים, כאל לחצים שווים. התנאי שהלוחית תהיה צמודה לצינור הוא:

$$F_{HS}(\text{כלפי מעלה}) - F_{HS}(\text{כלפי מטה}) \geq W$$

או לאחר שנציב את (11) ו- (12):

$$p\cdot A - p\cdot(A-A_0)= p\cdot A_0 \geq W \qquad (13)$$

הביטוי $p\cdot A_0$ הוא בעצם הכוח ההידרוסטאטי F^0_{HS}, הפועל מול פתח הצינור:

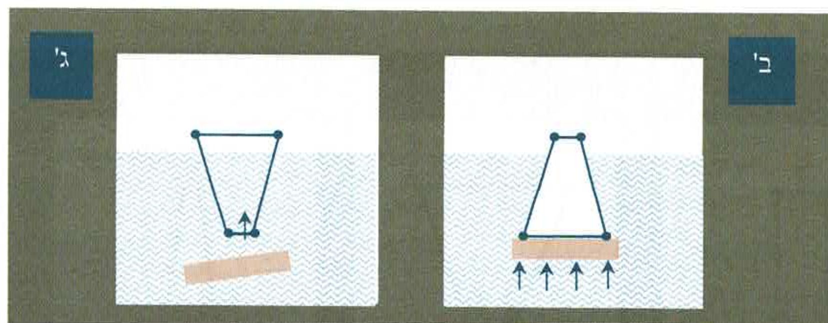
$$F^0_{HS} = p\cdot A_0 \qquad (14)$$

כלומר, על מנת שהלוחית תהיה צמודה אל הצינור, הכוח ההידרוסטאטי F^0_{HS}, הפועל מול פתח הצינור, חייב להיות גדול יותר או שווה למשקל הלוחית:

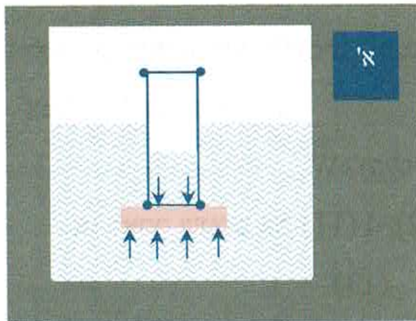
$$\boxed{F^0_{HS} \geq W} \qquad (15)$$

קיבלנו, שהכוח ההידרוסטאטי, ולא הלחץ בלבד, הוא שקובע, אם הלוחית תהיה צמודה אל הצינור או לאו. משום כך, אם נשתמש בצינור בצורת משפך או חרוט, כאשר פתח אחד גדול מהשני, וננסה לחזור על ההדגמה, יתכן מצב בו, כאשר נצמיד את הלוחית אל הפתח הרחב של הצינור, יישאר הדיסק צמוד אל הצינור עקב הכוח הידרוסטאטי, המספיק כדי לתמוך בו (תרשים ב'), וכאשר נהפוך את הצינור ונצמיד את הלוחית אל הפתח הצר של הצינור, תינתק הלוחית, ותשקע במים (תרשים ג'). שתי התוצאות תואמות לנוסחה (15) או:

$$F^0_{HS} = p\cdot A_0 \geq W \qquad (16)$$



אם מקטינים את שטח הצינור A_0, מקטינים בכך את הכוח ההידרוסטאטי, ובשלב מסוים מפרים את תנאי (16) עבור גודל הכוח הנדרש. כפי שרואים, גודל הכוח ההידרוסטאטי בפתח הצינור קובע אם, הלוחית נצמדת אל הצינור, או שוקעת במים.

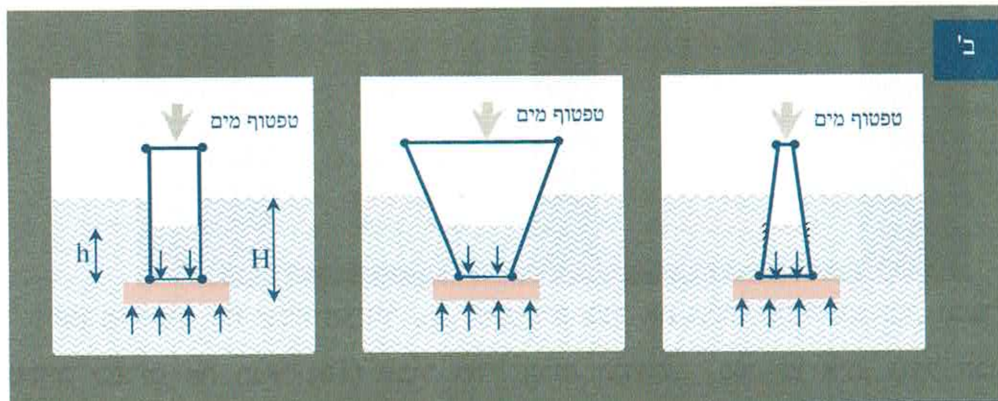


נחזור שוב להדגמה הראשונה בפרק. בהדגמה זו קבענו את גודל הכוח על ידי כך, שמילאנו את הצינור במים, עד שהלוחית ניתקה מהצינור. טענו, שגובה מפלס הנוזל ברגע הניתוק הוא כמו של הכלי, שמחוץ לצינור. תוצאה זו מותנית בכך, שמשקל הלוחית הוא זניח בהשוואה לכוח ההידרוסטאטי, שבתוך הצינור, המופעל על הלוחית כלפי מטה. אם המצב אינו כך, נוכל להבחין שגובה המים בתוך הצינור, ברגע שחל הניתוק של הלוחית, נמוך במידת מה מן המפלס, שמחוץ לצינור (תרשים א'). השיקול הוא פשוט: בזמן הניתוק, הכוח ההידרוסטאטי שבתוך הצינור, יחד עם משקל הלוחית, משתווה למשקל עמוד המים בהדגמה, כאשר הזנחנו את משקל הדיסק (תרשים א').

$$F_{HS}(\text{חיצוני}) = F_{HS}(\text{פנימי א'}) + W_{\text{דיסק}} \qquad (17)$$

נוסיף, שבמקרה זה משקלם של המים, שבתוך הצינור, משתווה לכוח ההידרוסטאטי, המופעל על הדיסק מלמעלה. נחקור עתה, כיצד משתנה המצב, כאשר משנים את השטח העליון של הצינור, ואת שיטחו התחתון משאירים ללא שינוי, וכיצד משתנות התוצאות במקרה ההפוך: כאשר משתנה השטח התחתון של הצינור, והשטח העליון נשאר ללא שינוי.

I. נבצע אותה הדגמה של לוחית, הצמודה לפתח צינור, הפעם - עם שלושה סוגי צינורות, אשר בכולם שטח הפתח התחתון הוא זהה (תרשים ב').



II. נשפוך מים לתוך הצינורות, ונוודא שבכולם המים יגיעו לאותו גובה לפני ניתוק הלוחית מן הצינור. בתרשים מוצג המצב בדיוק ברגע הניתוק. נראה את התוצאה על סמך ביטויים (2) ו- (17).

$$F_{HS}(\text{חיצוני})= F_{HS}(\text{פנימי א'})+ W_{\text{דיסק}}$$

$$d\cdot H\cdot A_0= d\cdot h\cdot A_0+ W_{\text{דיסק}}$$

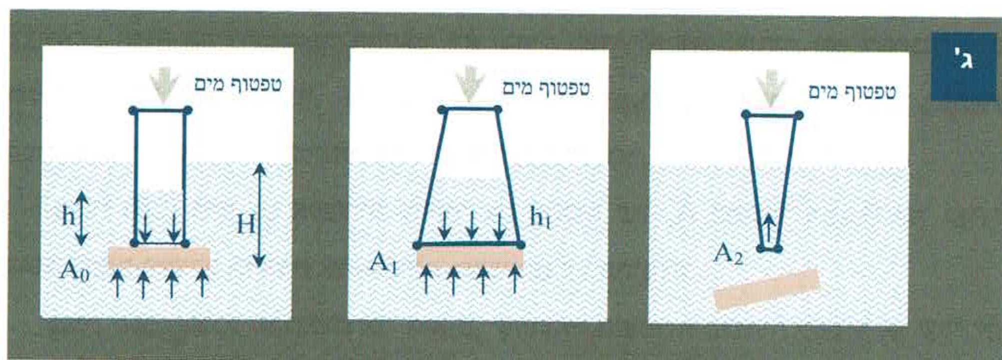
ומכאן:

$$h=\frac{d\cdot H\cdot A_0-W}{d\cdot A_0} \qquad (18)$$

(כדאי לראות, שכאשר מזניחים את משקל הדיסק W, מקבלים $h=H$)

בכל שלושה המקרים נקבל גובה זהה, h, כי בכל כלי שטח הפתח, A_0, לתוך המים היה זהה. במילים אחרות, בכל שלושת המצבים הכוח הידרוסטאטי על הלוחית מצד המים, שבתוך הצינור, היה זהה, וזה גם הכוח, הקובע אם הלוחית תיצמד אל פתח הצינור, בהתאם לביטוי (17).

III. נבצע אותה הדגמה עם הלוחית הצמודה לפתח הצינור עם שלושת סוגי הצינורות, ששטח הפתח התחתון שלהם הוא שונה (תרשים ג').



על מנת להסביר את התוצאה, עלינו לחזור לביטוי (17), ונפרט אותו לאור המצב החדש:

$$F_{HS}(\text{חיצוני})= F_{HS}(\text{פנימי א'})+ W_{\text{דיסק}}$$

עלינו להתחשב בכך, שבמקרה זה משתנה שטח הצינור, שפתחו אל המים. כבר הסברנו, מדוע גם בביטוי הלחץ ההידרוסטאטי החיצוני עלינו להשתמש בשטח הצינור. נקבל:

$$d\cdot H\cdot A= d\cdot h\cdot A+ W_{\text{דיסק}}$$

$$h = \frac{d \cdot H \cdot A - W}{d \cdot A} = H - \frac{W}{d \cdot A} \qquad (19)$$

קיבלנו תלות מעניינת של גובה עליית המים בתוך הצינור h ב- H . תחילה ניווכח בכך, שכאשר מזניחים את משקל הלוחית, מקבלים את התוצאה, בה התחלנו את הפרק: h=H.

גם המימד(היחידות) של התוצאה הן נכונות:

$$[h] = m - \frac{kg}{\frac{kg}{m^3} \cdot m^2} = m$$

מתוצאה (19) נובע, שכאשר אנו מגדילים את השטח A, עולה הגובה h, אם כי תמיד נשאר פחות מהגובה H (הגבהים משתווים, רק אם מזניחים לגמרי את משקל הלוחית, W). זהו המקרה השני (האמצעי) המוצג בתרשים ג'.

וכאשר מקטינים את הפתח A, הפונה אל המים, יורד הגובה h, ובשטח A_c מסוים מתאפס הגובה:

$$A_c = \frac{W}{d \cdot H} \qquad (20)$$

פירוש הדבר הוא, שאם נמשיך לשפוך מים לתוך הצינור, תינתק הלוחית מפתח הצינור : הכוח ההידרוסטאטי החיצוני לא יספיק בכדי לתמוך בלוחית וגם להתנגד לכוח ההידרוסטאטי מתוך הצינור. זהו המקרה השלישי (הימני) שבתרשים ג'. כלומר בפתחים קטנים יותר מ A_c (20), הלוחית לא תיצמד לפתח הצינור, ותרד לתחתית הכלי.

ביטוי (20) נותן גם אפשרות לחקור את התלות של A_c במשקל הסגולי של הנוזל. עומק הפתח ומשקל הלוחית W – כולם משפיעים על התופעה.

נציין שוב, שבכל ההדגמות אנו רואים, שתוצאת היצמדות הלוחית לצינור או שקיעתה במים נקבעת על ידי הכוח ההידרוסטאטי שבפתח הצינור. בהמשך נראה מקרים נוספים, בהם הכוח ההידרוסטאטי הוא חשוב.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1) הלחץ ההידרוסטאטי בנוזל:

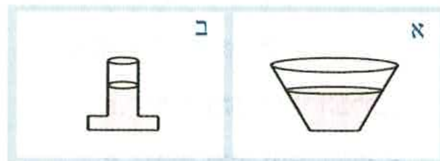
א. פועל לכל הכיוונים.

ב. תלוי בצורת הכלי, בו הוא נמצא.

ג. כיוונו זהה לכיוון פעולת הכוח

ד. כל התשובות נכונות.

2) בשני כלים (תרשים) מצוי נוזל זהה באותו הגובה. הכוח הפועל על בסיס הכלים:



א. גדול יותר בכלי א'.

ב. גדול יותר בכלי ב'.

ג. שווה בשני הכלים.

ד. אין די נתונים כדי לדעת, באיזה כלי פועל כוח גדול יותר על הבסיס.

3) כאשר אדם צולל בים, הלחץ שפועל על גופו תלוי:



א. במשקלו.

ב. בשטח גופו.

ג. במשקל הסגולי של גופו.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

4) טובלים אצבע בכוס, המכילה נוזל עד למחצית גובהה. כתוצאה מכך, הלחץ על קרקעית הכוס:



א. לא ישתנה.

ב. יקטן.

ג. יגדל.

ד. תלוי בנוזל, הנמצא בכוס.

5) טובלים אצבע בכוס המלאה בנוזל.



כתוצאה מכך, הלחץ על קרקעית הכוס:

א. לא ישתנה.

ב. יקטן.

ג. יגדל.

ד. תלוי בנוזל, הנמצא בכוס.

6) לשני כלים זהים מוזגים נוזלים שונים עד גובה זהה $(d_2 < d_1)$. כתוצאה מכך, הלחץ על הקרקעית:



a. יהיה זהה בשני הכלים.

b. יהיה גדול יותר בכלי א'.

c. יהיה גדול יותר בכלי ב'.

d. תלוי בשטח הבסיס של הכלי.

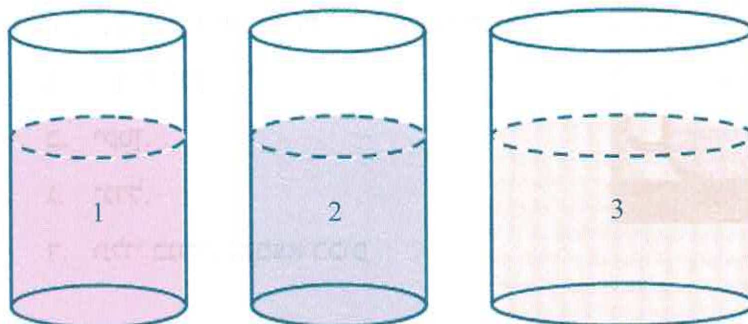
7) שטח הבסיס של קרקעית כלי א' וכלי ב' קטן פי 2 משטח הבסיס של כלי ג'. אם נמלא את שלושת הכלים בנוזלים שונים $(d_1>d_2>d_3=0.5d_1)$ עד גובה זהה, נקבל ש:

a. הלחץ ההידרוסטאטי שווה בכלים 1 ו-3

b. הכוח ההידרוסטאטי שווה בכלים 1 ו-3 .

c. הלחץ ההידרוסטאטי הגדול ביותר פועל על קרקעית כלי 2.

d. הכוח ההידרוסטאטי הגדול ביותר פועל על קרקעית כלי 2.



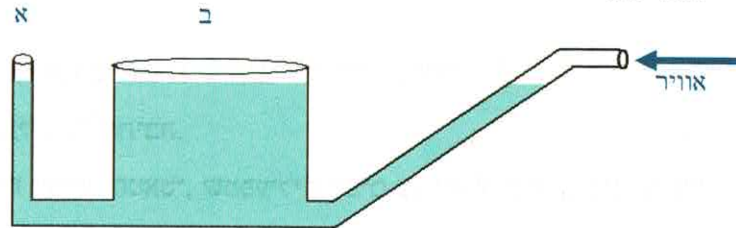
8) מערכת של שלושה צינורות מכילה נוזל מסוים, כמתואר בשרטוט. שטח החתך של צינור א' גדול משטח החתך של צינור ב'. כאשר נדחוס אוויר דרך פתח ג':

א. הנוזל בכלי א' יעלה לגובה גדול מן הנוזל בכלי ב,' כי שטח חתכו גדול יותר.

ב. הנוזל בכלי ב' יעלה לגובה גדול מן הנוזל בכלי א', כי שטח חתכו קטן יותר.

ג. הנוזל יעלה לאותו גובה בשני הצינורות.

ד. ההבדל בגובה הנוזל בכלים א' ו- ב' ישתנה בהתאם לסוג הנוזל, שנכניס למערכת.



9) בשני כלים מצויים נוזלים שונים. אם הלחץ על קרקעית הכלים זהה, זה אומר ש:

א. משקל הנוזלים בשני הכלים זהה.

ב. נפח הנוזלים בשני הכלים זהה.

ג. גובה הנוזלים בשני הכלים זהה.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

10) שני הכלים, המתוארים בשרטוט, הם בעלי אותו שטח בסיס, ומונחים על שתי כפות מאזניים. הכלים מכילים אותו נוזל, הנמצא באותו גובה: במצב זה:

א. הכוח הפועל על קרקעית הכלים זהה.

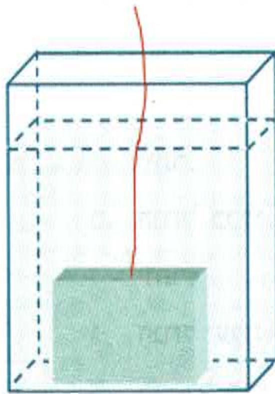
ב. המאזניים יהיו מאוזנים, כי פועל על הכפות אותו כוח.

ג. המאזניים יוטו לצד א', כי משקל הנוזל שבכלי א' גדול יותר ממשקל הנוזל שבכלי ב'.

ד. תשובות א' ו- ג' נכונות.



דוגמה



תיבה, שגובהה 0.3m, ושטח חתך הרוחב שלה $0.0008m^2$, עשויה מעץ, שצפיפותו $600\frac{kg}{m^3}$. התיבה מונחת על קרקעית מיכל מים, וצמודה לקרקעית באמצעות גומי, כך שאין מים בין התיבה לקרקעית. אם גובה המים במיכל 0.8m, מהו הכוח ההתחלתי הדרוש להרמת התיבה בעזרת חוט, שמשקלו זניח?

פתרון:

כדי להרים את התיבה עלינו להתגבר על שני כוחות:

א. משקלה של התיבה.

ב. הכוח ההידרוסטאטי, שמפעילים המים על החלק העליון של התיבה.

נמצא תחילה את משקלה של התיבה:

נפח התיבה (שטחה x גובהה): $V = A \cdot h = 0.0008m^2 \ 0.3m\cdot =0.00024m^3$

צפיפות התיבה היא $\rho = 600 \frac{kg}{m^3}$, מכאן שמשקלה W הוא:

$$W = V\cdot\rho\cdot g = 0.00024m^3 \cdot 600\frac{kg}{m^3} \cdot 10 \frac{m}{sec^2} = 0.144N$$

עתה נמצא את הכוח ההידרוסטאטי, הפועל על התיבה. נתון, שגובה המים במיכל 0.8m, וגובה התיבה 0.3m, לכן גובה המים שמעל לתיבה הוא 0.5 m.

גובה הנוזל מעל החלק העליון של התיבה: $h = 0.5\ m$

צפיפות המים: $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$, שטח חתך הרוחב של התיבה: $A = 0.0008m^2$

הכוח הפועל על הדופן העליון:

$$F = h\cdot\rho\cdot g\cdot A = 0.5\ m \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}\cdot 10 \frac{m}{sec^2}\cdot 0.0008m^2 = 0.4N$$

הכוח ההתחלתי, שיש להפעיל, הוא **סכום** שני כוחות אלה:

$$W + F = 0.144N + 0.4N = 0.544N$$



שאלות חישוב

1) באיזה עומק בים יש לחץ של 30000Pa , אם ידוע שצפיפות מי- הים היא $1030\frac{kg}{m^3}$?

2) יוצקים למשורה מים , $\rho=1000\frac{kg}{m^3}$ בגובה של 0.08m, ומעליהם נפט,

$\rho = 800\frac{kg}{m^3}$, בגובה 0.12 m מהו הלחץ הכולל על קרקעית המשורה ?

3) א. חשבו את גובה המים בכלי, המתואר בשרטוט, אם ידוע, שהלחץ, שמפעילים שלושת הנוזלים על הקרקעית הוא 29888Pa.

ב. מצאו את הלחץ בנקודות 1 ו- 2 .



צפיפות הנפט היא $800\frac{kg}{m^3}$.

צפיפות המים היא $1000\frac{kg}{m^3}$.

צפיפות הכספית היא $13600\frac{kg}{m^3}$.

4) לחץ המים בקומה הראשונה בבית מגורים הוא 300000Pa, ובקומה השנייה – Pa 260000 . בכמה מטרים גבוהה הקומה השנייה מהראשונה ?

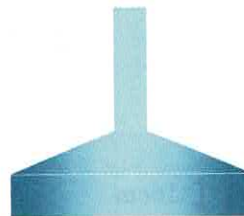
5) אקווריום, שאורך בסיסו $\frac{1}{2}$ מטר ורוחבו $\frac{1}{4}$ מטר, מכיל מים, $\rho=1000\frac{kg}{m^3}$. אם ידוע שגובה המים באקווריום הוא 0.4 m, מהו הכוח הפועל על הקרקעית ?

6) מיכלית מכילה בנזין, $\rho = 700\frac{kg}{m^3}$. בקרקעית המיכלית מצוי ברז, ששטח החתך שלו $0.002\ m^2$. הכוח, שהבנזין מפעיל על הברז, הוא 100 N. מה גובה הבנזין מעל לברז המיכלית ?

7) בבית מגורים זורמים מים, $\rho = 1000\frac{kg}{m^3}$, מצינור, הנמצא בקומת הקרקע בלחץ של 400000Pa. המים מפעילים כוח על הברז, שנמצא 10 מטר מעל לקומת הקרקע. שטח החתך של הברז הוא $0.001m^2$. מהו הכוח, שמפעילים המים על הברז?

8) מיכלית מכילה נפט, $\rho = 700\frac{kg}{m^3}$. בעת גרירת המיכלית נפער בקרקעיתה חור, ששטחו $0.0015\ m^2$ כדי שהנפט לא יישפך, **היניחו** מתחת למיכלית לוחית, שסתמה את החור. אם משקלה של הלוחית 10N, והכוח שיש להפעיל על הלוחית כלפי מעלה על מנת למנוע הישפכות של הנפט הוא 90N, מהו גובה הנפט במיכלית?

9) לכלים, המתוארים בשרטוט, מוזגים מים: לכלי א' – $0.0005m^3$, ולכלי ב' - $0.001m^3$. אם שני הכלים הם בעלי אותו שטח בסיס, באיזה כלי פועל על הקרקעית כוח גדול יותר, ופי כמה ?

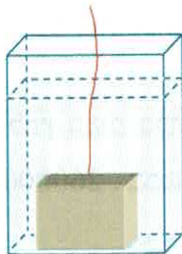


כלי א'



כלי ב'

10) תיבת עץ, שאורך בסיסה 3 ס"מ ורוחבה 2 ס"מ, מונחת על קרקעית מיכל. התיבה עשויה מעץ, שצפיפותו $\rho = 800\frac{kg}{m^3}$, וגובהה 0.4m. גובה הנוזל מעל תיבת העץ הוא 0.2m. אם ידוע שהכוח ההתחלתי הדרוש להרמת התיבה, הוא 3.12N, איזה נוזל נמצא במיכל ?



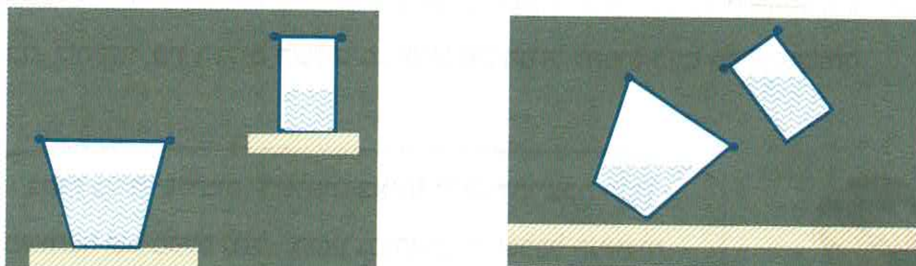
תשובות

1) 2.912 m **2)** 1760 Pa **3)** א. 0.14 m ב. 2680 Pa בנקודה 1, 1280Pa בנקודה 2.

4) 4 m; **5)** 500 N **6)** 7.14 m **7)** 300N **8)** 7.619 מ'.

9) על כלי א', פי 2. **10)** $\rho = 1000kg/m^3$, הנוזל הוא מים.

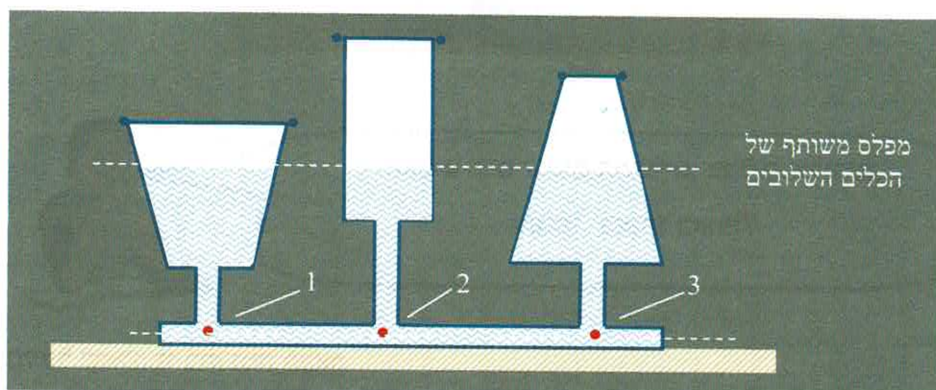
כפי שראינו, בשתי נקודות, המצויות **באותו עומק** בתוך נוזל אחיד, שורר לחץ הידרוסטאטי זהה. לחץ זה נגרם על ידי עמוד הנוזל באורך העומק, בו נמדד הלחץ. מכאן גם ההסבר לתכונה הבולטת של הנוזלים: **מפלס אופקי.**



מפלס הנוזל בעצם תואם לרמה בה שורר רק הלחץ האטמוספרי. כל סטייה ממנו גורמת מיד להפרש לחצים, ועקב כך לתנועת הנוזל, מהמקום בו הלחץ גבוה אל המקום בו הלחץ ההידרוסטאטי נמוך יותר. כך מסתדר נוזל בכל כלי. הכלי יכול לשנות את מקומו, ואיתו זז מפלס הנוזל שבו. המצב משתנה כאשר מדובר בכלים המחוברים זה לזה דרך צינור כלשהו, המאפשר תנועה חופשית של הנוזל מכלי אחד לכלי שני. כלים מחוברים כאלה מכונים כלים שלובים. נבדוק, כיצד מסתדרים נוזלים בתוך כלים שלובים,ולשם כך נבצע מספר הדגמות:

הדגמה מס' 1

ניקח מערכת כלים שלובים, כמו בתרשים, ונמזוג לתוכה נוזל כלשהו. נראה שבאופן טבעי יתפלגו המים בין כל הכלים באופן מסוים, דהיינו, בכל הכלים הגיע הנוזל לאותו גובה. נקשר עובדה זו לידע, שצברנו, לגבי תכונות הנוזלים.

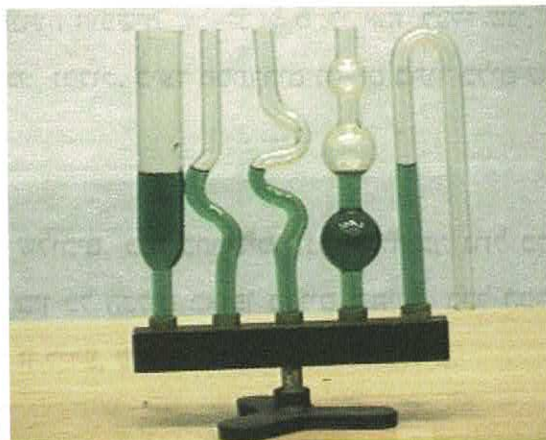


בתוך הצינור נבחר בנקודות 1, 2, 3, אחת מתחת לכל כלי. הנקודות מצויות בעומק זהה ביחס למפלס שבכל כלי, ולכן לוחץ עליהן עמוד נוזל בגובה זהה (לחץ הידרוסטאטי זהה). האם יכול היה להיות אחרת? אם נניח שכן, היינו מקבלים, שבכל נקודה שורר לחץ הידרוסטאטי שונה. כתוצאה מכך היה הנוזל נע. עד מתי? עד שקיימת סיבה לכך – עד שהיו נוצרים גבהים שונים בתוך הכלים. כפי שרואים, טענה זו מחייבת רק עומק שווה של הנקודות בכל כלי, ואינה מתייחסת לכמות הנוזל שבתוכו. אנו הגענו למסקנה חשובה, שהקשר בין הכלים השלובים מחייב את הנוזל לתפוס בהם מפלס משותף.



בתוך כלים שלובים, המלאים באותו נוזל, מתייצבת רמה משותפת של מפלס נוזל. מכאן גם העובדה, שבכל הנקודות, המצויות במישור אופקי כלשהו בתוך הכלים השלובים, שורר לחץ הידרוסטאטי שווה.

טענה זו מכונה **חוק הכלים השלובים.**



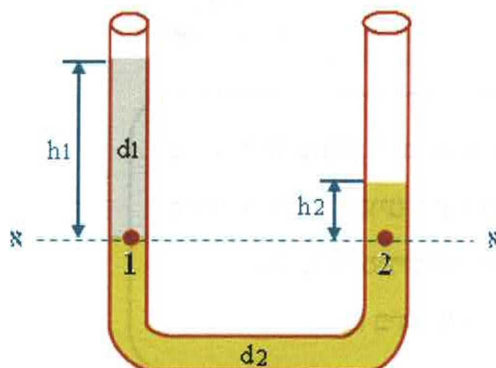


האם נוזלים שונים המצויים, בכלים שלובים, יתנהגו באותו האופן?

נענה על שאלה זו בהדגמה הבאה.

הדגמה מס' 2

לתוך צינור בצורת האות U ונמזוג שני נוזלים שונים בצפיפות. נבחר נוזלים, שאינם מתערבבים זה בזה (שמן ומים, למשל).



תחילה נמזוג את המים, ולאחר מכן נוסיף באופן איטי את השמן. נראה, שהפעם הנוזלים יגיעו לאיזון, כאשר הם נמצאים בגובה שונה של המפלס בזרועות.

נבדוק את הקשר בין שני המפלסים בזרועות הצינור (תרשים). נשים לב, שקיים מישור – שנסמן אותו ב- א-א, שמתחתיו נמצא אותו סוג של נוזל, ומעליו נמצא בזרוע האחת של הצינור נוזל אחד ובזרוע השנייה – נוזל שני. מתוך מה שלמדנו ברור, שהלחץ ההידרוסטאטי בנקודות שבמישור זה (נקודות 1 ו- 2 שבתרשים) הוא זהה.

שוויון הלחצים בנקודות 1 ו- 2 מצביע גם על כך, שהלחץ, שיוצר עמוד הנוזל הראשון בעומק h_1 מן המפלס, שווה ללחץ של עמוד הנוזל השני בעומק h_2 מן המפלס שלו. נחשב לחץ זה. כפי שלמדנו, הלחץ של הנוזל הראשון בנקודה 1 הוא:

$$P_1 = h_1 \cdot g \cdot \rho_1$$

באותו אופן הלחץ בנקודה 2 הוא:

$$P_2 = h_2 \cdot g \cdot \rho_2$$

נשווה אותם:

$$h_1 \cdot \rho_1 = h_2 \cdot \rho_2 \qquad (1)$$

ומקבלים, שהיחס בין העומקים הוא כמו היחס ההפוך שבין המשקלים הסגוליים של הנוזלים:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \qquad (2)$$

נסכם:

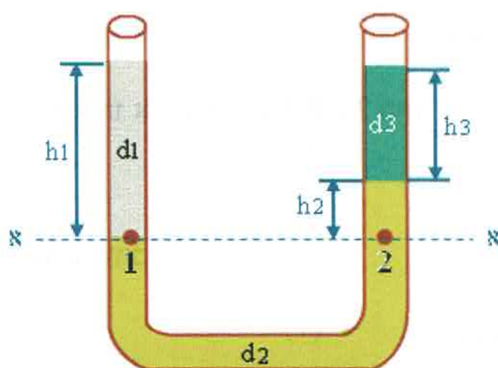


שני נוזלים שונים, הנמצאים בכלים שלובים, יוצרים מצב, שבו מתחת למישור מסוים נמצא הנוזל בעל הצפיפות הגדולה יותר.
אורכי העמודים של הנוזלים שמעל למישור זה
הם ביחס הפוך לצפיפויות שלהם.

מחוק פסקל אנו יודעים, שהלחץ ההידרוסטאטי בתוך נוזלים עובר ללא שינוי לכל כיוון. מכאן נובע, שהטענה לגבי מפלסי הנוזלים, שקיבלנו, נשארת תקיפה עבור כל צורות הכלים השלובים.

נוכל גם להרחיב את המסקנות ליותר משני סוגי נוזלים, הנמצאים בכלים משולבים. נתאר מצב בו שלושה סוגי נוזלים נמצאים בתוך צינור U.

גם במקרה זה ניתן יהיה להבחין בקיום המישור האופקי א-א שמתחתיו אותו סוג של נוזל. שוויון הלחצים בנקודות 1 ו- 2 מאפשר לקבוע את היחס בין גבהי הנוזלים שמעל למישור א-א והקשר שביניהם לבין צפיפויות הנוזלים.



נסמן בקו אופקי את משטח הגבול הנמוך ביותר, המפריד בין הנוזלים. נשווה בין הלחצים האלה מתוך העובדה, שהם נוצרים על ידי עמודים של נוזלים שונים.

נוכל לרשום:

$$P_1 = h_1 \cdot g \cdot \rho_1$$

בו בזמן שבזרוע השנייה נקבל:

$$P_2 = h_2 \cdot g \cdot \rho_2 + h_3 \cdot g \cdot d_3$$

השוואה בין הלחצים נותנת:

$$h_2 \cdot \rho_2 + h_3 \cdot \rho_3 = h_1 \cdot \rho_1 \qquad (3)$$



קשר זה מחליף את קשר (2), כאשר מדובר בשלושה סוגי נוזלים בעלי משקלים סגוליים שונים שבתוך כלים שלובים עם שתי זרועות.

עיקרון הכלים השלובים חשוב מאוד, כי הוא מבסס את מערכות הספקת המים. כך בכל ישוב מערכת הספקת המים כוללת מגדל מים. מערכת המים מהווה מערכת של כלים שלובים, לכן הפרשי גבהים בין מגדל המים והצרכנים בישוב גורמת להזרמת המים במערכת.


מוביל המים בקיסריה מהתקופה ההרודיאנית

מערכות הספקת מים נבנו עוד לפני אלפי שנים. בזמן האימפריה הרומית נבנו עשרות של מובילי מים בארצות שונות. כך למשל כבר במאה ה- 1 לפני הספירה בנה המלך הורדוס מערכות משוכללות של אספקת מים מהרי חברון להר- הבית בירושלים. במערכת זו היה שימוש רחב בתכונות הכלים השלובים. אפשר לראות את שר ידי מובילי המים, הבנויים על עיקרון הכלים השלובים, בקיסריה, ברומא ובמקומות אחרים.

נציין גם, שעקב התחממות , פני כדור הארץ, הקרח בקטבים (אנטארקטיקה שבקוטב הדרומי וארקטיקה בקוטב הצפוני) הולך ונמס בקצב כה גבוה, עד שהנושא הפך לנושא מרכזי בדאגת הקהילה הבינלאומית. תהליך זה, בהתאם לחוק הכלים השלובים, גורם לעלייה במפלס המים על פני כל כדור הארץ. כתוצאה מכך, אם יימשך התהליך וייעלמו כמויות ענקיות של קרח, נצטרך "להיפרד" ממדינות כמו הולנד, דנמרק ואחרות.

האם מים יכולים באופן טבעי לזרום כלפי מעלה?

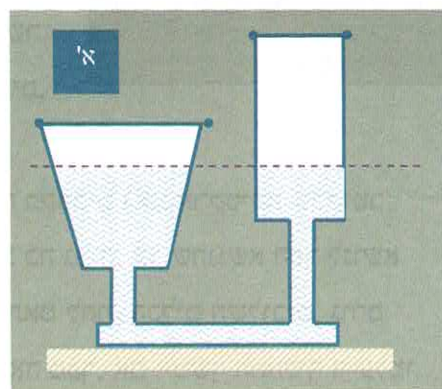


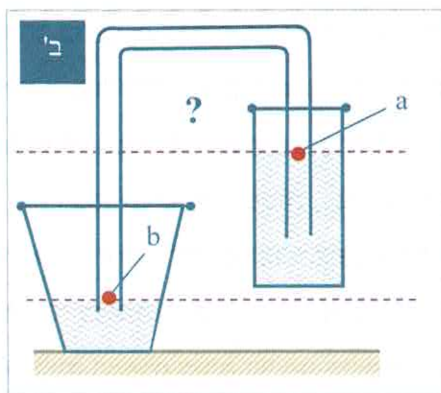
סיפון

חוק הכלים השלובים מאפשר להבין את אופן הפעולה של מכשיר חשוב ביותר בטכנולוגיה, הקשורה לנוזלים – הסיפון. מכשיר זה הוא עתיק יומין, אך הוא ממשיך לשרת אנשים בכל מקום.

נציין, שבטיפול בכלים שלובים לא הזכרנו את הלחץ האטמוספרי על פני הנוזל. זאת משום שלחץ זה פעל על פני הנוזל בכל הכלים, והיה מתווסף בכל החישובים בשני האגפים של משוואת איזון הלחצים, בין אם בביטוי (1) או (3). במצב זה היה מדובר בכלים, שהחיבור ביניהם היה בחלקם התחתון (תרשים א').

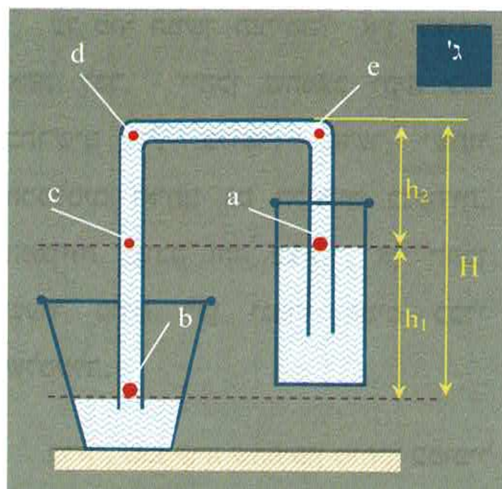
אבל ניתן לקשר בין הכלים גם באופן אחר, כאשר צינור החיבור מתרומם לגובה שמעל לכלים, בטרם הגיעו לכלי השני (תרשים ב'). מה יקרה במקרה זה? האם יעבוד חוק הכלים השלובים? כלומר, האם יזרום נוזל בין הכלים בתהליך, שיסתיים בהשוואת המפלסים בשני הכלים?





תחילה נחשוב על מצב, בו הצינור המחבר בין הכלים נמצא בגובה שונה רק מהנוזל (תרשים ב'). במצב זה שתי הנקודות a ו- b, הקרובות למפלס הנוזל בכל אחד מן הכלים, מצויות בגובה שונה, אך שורר בהן אותו הלחץ – הלחץ האטמוספרי. במצב זה לא יזרום נוזל מכלי אחד לשני.

לעומת זאת, אם נתבונן במצב בו צינור החיבור בין הכלים מלא בנוזל, השיקולים ישתנו (תרשים ג'). הלחץ בנקודות a ו- b יישאר שווה ללחץ האטמוספרי p_0, אך הלחץ בנקודה c, המצויה באותו מישור אופקי עם נקודה a, יהיה פחות מהלחץ האטמוספרי:



$$p_c = p_0 - h_1 \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

נוצרת ירידה של הלחץ בצינור, מלחץ p_0 ועד ללחץ השורר בנקודה d, הנקודה הגבוהה שבצינור החיבור:

$$p_d = p_0 - H \cdot \rho \cdot g \quad (5)$$

באופן דומה נוכל לטעון שבנקודה e, הנקודה שמעל לנקודה a, הלחץ ההידרוסטאטי הוא:

$$p_e = p_0 - h_2 \cdot \rho \cdot g \quad (6)$$

אנו רואים, שהלחץ בנקודה c קטן יותר מן הלחץ בנקודה a, והלחץ בנקוד d קטן יותר מן הלחץ בנקודה e. כלומר, במצב זה נוצר הפרש לחצים בין הנקודות בתוך הנוזל. כתוצאה מכך הנוזל יזרום מנקודה a אל תוך הצינור, בו הלחץ יהיה נמוך יותר. נקבל את הפרש הלחצים הגורם לזרימה בתוך הסיפון השווה:

$$\Delta p = p_a - p_c = p_e - p_d =$$

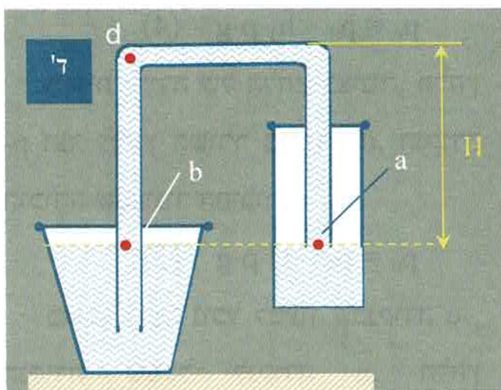
$$(H - h_2) \cdot \rho \cdot g = h_1 \cdot \rho \cdot g$$

כלומר:

$$\Delta p = h_1 \cdot \rho \cdot g \quad (7)$$

הפרש הלחצים ההידרוסטאטיים, המניע את פעולת הסיפון, נמצא ביחס ישר להפרש המפלסים בין הכלים השלובים ולצפיפות של הנוזל





עד מתי תמשך הזרימה? אין תשובה אחת לכך. ייתכן שהמצב יהיה כמו בתרשים ד', כלומר, כאשר ישתוו המפלסים ואיתם גם הלחצים בנקודות, המצויות בגובה זהה בצינור, אך ייתכן שעוד קודם לכן יגמרו המים בכלי שלמעלה.

ברור, שבמקרה שהסיפון מותקן במוביל מים ממקור טבעי פעולת הסיפון לא תיפסק.

בכל מקרה, מטרת הסיפון הושגה, כאשר מים מכלי או ממאגר, המצוי גבוה יותר, עוברים לכלי או למאגר, המצוי נמוך יותר, ובדרך עולים לגובה, וכך הם חולפים על פני מחסום בין הכלים.

יכול להיווצר הרושם, שבאמצעות הסיפון ניתן להעביר מים מעל מחסום בגובה כלשהו. ואולם, כבר לבנאים בתקופה העתיקה התברר, שפעולת הסיפון מוגבלת בהפרש הגבהים. אנו יכולים לזהות את המגבלה כבר מהביטויים (4), (5), ו- (6).

אנו רואים שהלחץ ההידרוסטאטי בסיפון יורד מערך הלחץ האטמוספרי p_0. היות והלחץ בתוך הנוזל אינו יכול להיות גודל שלילי, אנו מקבלים את המגבלה על ידי השוואת הביטוי (5) עבור הלחץ בנקודה p_d (הלחץ ההידרוסטאטי הנמוך בתוך המערכת) לאפס:

$$p_d = p_0 - H \cdot \rho \cdot g = 0$$

מכאן:

$$H_{max} = \frac{p_0}{\rho \cdot g} \qquad (8)$$

אם נציב לכאן את לחץ האוויר באטמוספרה ואת צפיפות המים נקבל:

$$H_{max} = 10.33\ \text{m} \qquad (9)$$

זהו הערך הגבולי ליעילות הסיפון, שנודעה לבונים של מובילי המים בעת העתיקה. הם לא ידעו את הסיבות לכך, אך גילו את המגבלה באופן ניסיוני. מוביל המים מהרי חברון להר הבית, אשר נבנה לפני כאלפיים שנה, כלל בדרך גם מספר סיפונים.



פעולת הסיפון מבוססת על קיום הלחץ האטמוספרי.



ללא אטמוספרי סביב כדור הארץ, הסיפון לא היה עובד..
מכאן נובע, שעצם פעילות של הסיפון היא הוכחה
לקיום הלחץ האטמוספרי!

לחץ אטמוספרי וברומטר

כאמור ללא האטמוספרה הסיפון לא היה קיים. אם כך, עצם פעולת הסיפון יכולה להוות עדות ניסיונית לקיום הלחץ האטמוספרי, וגובה העלייה המקסימאלי של הנוזל בסיפון (8) יכול לשמש **כמדד ללחץ** זה. ואולם, בגלל אורך של כ- 10 מ' גובה של עמוד המים, ברור שהמים אינם הנוזל הנוח לעריכת ניסויים למדידת הלחץ האטמוספרי. לעומת זאת, אם נשתמש בנוזל הכבד ביותר הקיים, מתכת הכספית ($\rho= 13600\frac{kg}{m^3}$) לפי נוסחה (8) נקבל:

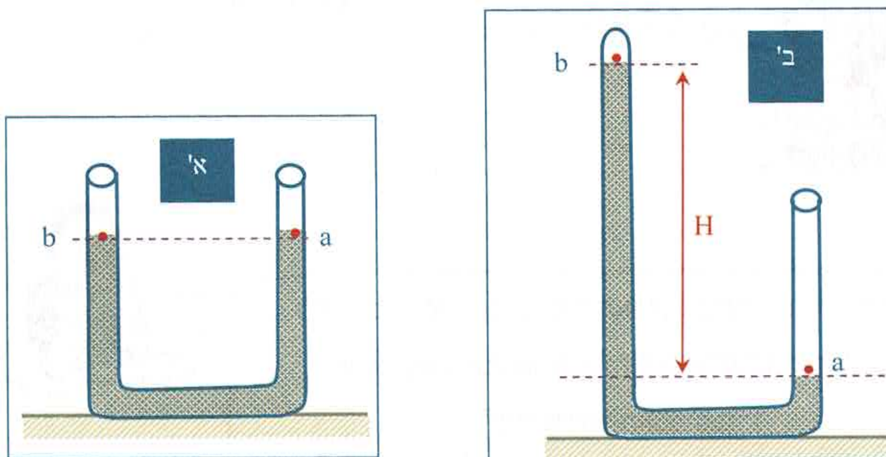
$$H_{max} = 0.76 \text{ m} = 760\text{mm} \qquad (10)$$

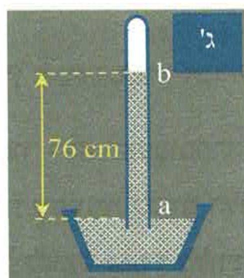
גובה זה נוח מבחינה ניסויית, והפך את הכספית לחומר נפוץ עבור ניסויים במדע. עם זאת, התברר שאדי הכספית הם רעילים מאוד לאדם. מסיבה זו אין מבצעים ניסויים בכספית במערכת החינוך, וגם אנו נסתפק בניסוי מחשבתי בלבד.

ניקח צינור בצורתU, ונמלא אותו בכספית (תרשים א'). כאמור איזון הכספית בשתי הזרועות של הצינור נובע מקיום הלחץ האטמוספרי, p_0, בגובה המפלס (נקודות a ו-b בתרשים). לכן, אם נסלק לחץ זה בדרך כלשהי מאחת הזרועות (תרשים ב'), נגיד בנקודה

b, האיזון ייפסק, והפרש המפלסים בין הזרועות, האיזון החדש, יצביע על גודל הלחץ האטמוספרי:

$$p_a = H\cdot\rho\cdot g \qquad (11)$$





נשארת השאלה אם כך, כיצד לסלק את האוויר מאחת מזרועות צינור ה- U? את הבעיה הזו פתר בקלות איטלקי בשם טוריצ'לי (תלמידו של גלילאו) בשנת 1644. הוא הכין צינור זכוכית, סגור מצדו האחד, שאורכו כמטר, מילא אותו בכספית, והפך אותו לתוך צנצנת שטוחה, גם היא מלאה בכספית (תרשים ג').

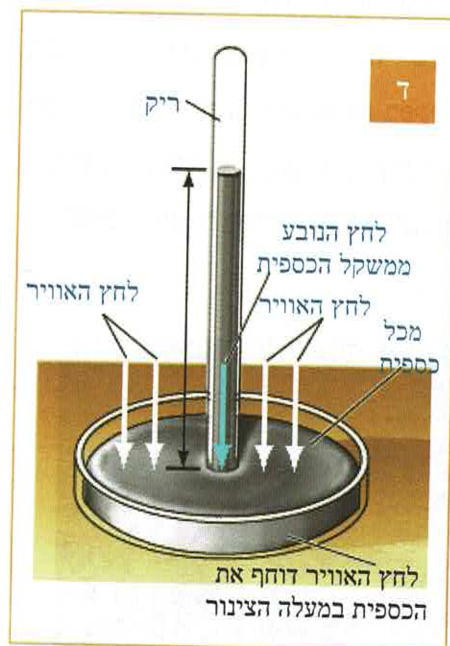

אוונג'ליסטה טוריצ'לי
1647 - 1608

כפי שציפה, הכספית לא ירדה כולה לתוך הצנצנת, אלא ירדה במקצת, והתייצבה ברמה של כ- 76 סמ' מעל מפלס הכספית בצנצנת. כאמור, גובה עמוד הכספית מעיד על גודל הלחץ האטמוספרי הקיים.

כך הפך המכשיר של טוריצ'לי לברומטר הראשון. "ברוס" – שפירושו ביוונית לחץ, ו"מטר" – מדידה. מהצירוף נובע השם ברומטר, שהוא מכשיר למדידת לחץ. הברומטר של טוריצ'לי (תרשים ד') הוא מכשיר מדויק והוא מאפשר לראות את שינויי הלחץ עקב העלייה בגובה. למשל, בעליה להרים מבחינים בקלות בירידת הלחץ,אז גם מופיעים קשיים רציניים בנשימה וביכולת לתפקד. הברומטר של טוריצ'לי אינו נוח לשימוש מסיבות ברורות.

לכן נמצא בשימוש רחב סוג אחר של ברומטר, שאינו כולל נוזל. במקומו משתמשים בקופסת מתכת, שרוקנה מן האוויר באופן חלקי. שינוי בלחץ החיצוני באוויר גורם לעוות בדפנות הקופסה, אשר גורם לשינוי בקריאה של המכשיר. ברומטר זה מכונה ברומטר-אנרואידי (תרשים ה). ברומטר זה הוא הרבה פחות מדויק מברומטר הכספית, כי תגובת המתכת ללחץ משתנה עם הזמן. לכן, במקומות שנדרש בהם דיוק, יש להשתמש בדרכים אחרות למדידת הלחץ האטמוספרי.





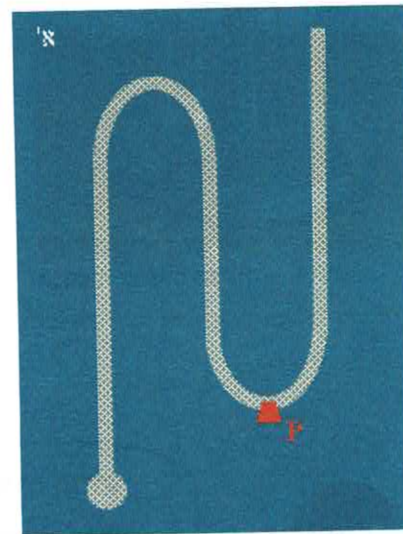


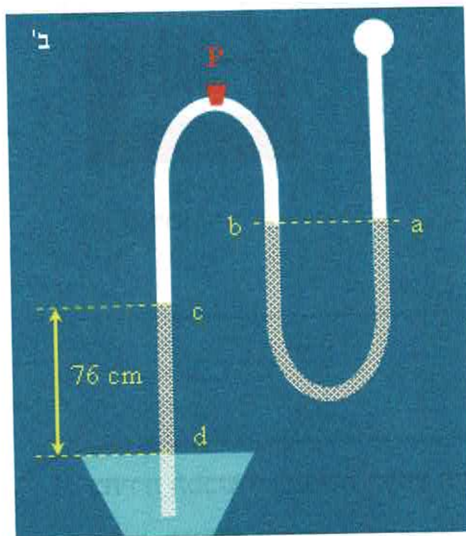
בחירת המכשיר למדידת הלחץ תלויה במידת הדיוק הנדרש, בגודלה ובתנאים, בהם צריך למדוד את הלחץ. כשלא נידרש דיוק גבוה , משתמשים בברומטר אנרואידי.

ברומטר הכספית של טוריצ'לי גילה אפשרות לקבל מצב חדש שלא היה מוכר קודם – ריק. דעות המדענים היו חלוקות בנושא זה, וחלקם הגדול לא קיבלו את הריק כאפשרות קיימת. רוב המדענים, כולל גלילאו, חשבו על יכולת הריק לשאוב את החומר בתוכו. אנשים האמינו בכך שה"טבע סולד מהריק".

נראה את הניסוי של פסקל מהמאה ה-17, אשר הראה את קיום הריק וביטל את המחלוקת.

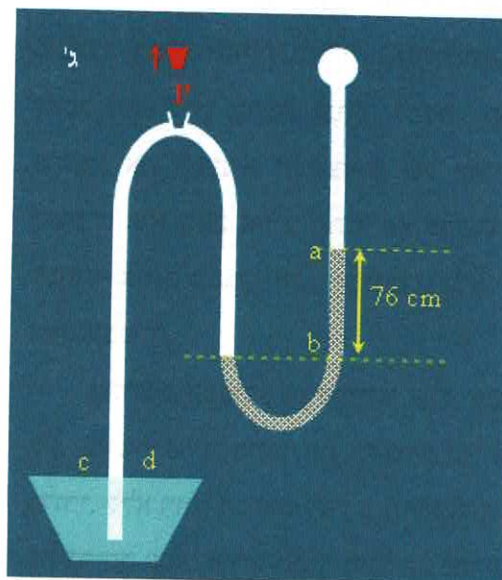
על מנת להראות את צדקתו לטענה, שהריק אינו משפיע על החומר, פסקל הכין צינור בצורה מיוחדת, המזכירה חיבור של שני צינורות בצורת U, כפי שמראה תרשים א'. הצינור כלל גם פתח קטן סתום בפקק P. פסקל מילא את הצינור בכספית, כפי שמתואר בתרשים. לאחר מכן הפך את הצינור לתוך צנצנת עם כספית (תרשים ב'). במצב זה חלק מן הכספית נשפך לתוך הצנצנת, וחלק נשאר בתוך הצינור, והסתדר, כפי שמראה תרשים ב'.





בצינור ליד הצנצנת נוצר עמוד כספית בגובה של 76 ס"מ בדיוק כמו בברומטר של טוריצ'לי (בין נקודות c ו-d). עם זאת, לא היה שום הבדל בין המפלס בנקודה b ומפלס הכספית בנקודה a. אם הריק שואב את החומר, מדוע הוא לא עושה זאת בנקודות b ו-a?

בשלב הבא, פסקל הוציא את הפקק P מן הפתח בצינור (תרשים ג'), ואוויר היה יכול להיכנס לתוך הצינור ממקום זה. כתוצאה התרחש שינוי מהותי: עמוד c-d של הכספית נעלם, ולעומת זאת, נוצר הפרש גבהים בין המפלס בנקודה b והמפלס בנקודה a. גודל הפרש הגבהים היה שוב 76 סמ'.

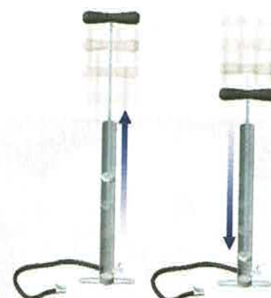


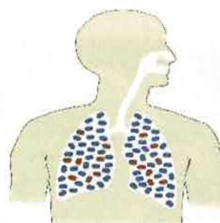
את שהתרחש בניסוי קל היה להסביר על סמך ההבנה של הלחץ האטמוספרי וקיום הריק, שאינו משפיע על החומר בשום אופן. במתקן נוצר מצב מעניין של "ריק בתוך ריק", ולכן ניסוי זה מאז מכונה כך. עמוד הכספית cd שהתקיים, כאשר היה ריק מעל נקודה c, חדל להתקיים, כאשר הגיע אוויר לנקודה זו, ובשני הצדדים של עמוד כספית זה שרר לחץ אטמוספרי באותה מידה. בנוסף, כאשר בשני המקומות a ו- b היה ריק לא היה שום הפרש בין המפלסים.

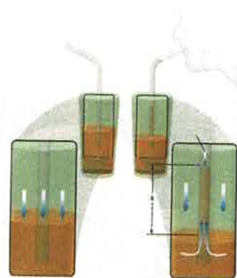
הדבר השתנה, כאשר נכנס האוויר לנקודה b של הצינור. אוויר זה לחץ על הכספית, ויצר הפרש בין המפלסים בין הנקודות a ו- b.

כאמור, הניסוי היה משכנע, והטענה של פסקל, שאנו חיים על קרקעית אוקיאנוס של אוויר, אשר לוחץ עלינו ללא הרף, הפכה להיות עובדה מדעית.

פסקל סיים את עבודתו ברשימת ביטויים של הלחץ האטמוספרי כגון: הקושי לפתוח את המפוח, להפריד בין שני גופים חלקים במיוחד, לאחר שהוצמדו אחד לשני, זרימת מים בסיפון, שאיבה במשאבה, מאמץ במציצה על ידי תינוקות, מאמץ בנשימה.


משאבה


נשימה


יניקה

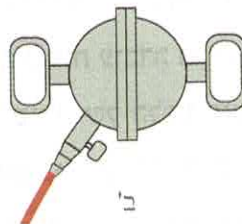

אוטו פון גריקה
1686 - 1602

חיזוק מיוחד להבנת הלחץ האטמוספרי סיפק מדען חובב ואיש טכנולוגיה מוכשר אוטו פון גריקה, שהיה גם ראש עיר מגדנבורג שבגרמניה, במאה ה- 17. ההישג הגדול שלו היה בנייה של משאבה בעלת יכולת גבוהה. לראשונה קיבלו אנשים אפשרות לקבל תת- לחץ ברמה גבוהה למדי. פון גריקה החליט לבדוק ולהציג את הטענות והתוצאות של טוריצ'לי ופסקל. בניסויים השונים הוא שאב אוויר מתוך תא כלשהו והדגים את הקושי הרב לפתוח אותו במצב זה. כלומר, הוא הצליח להמחיש את קיום הלחץ הגבוה של האטמוספרה.

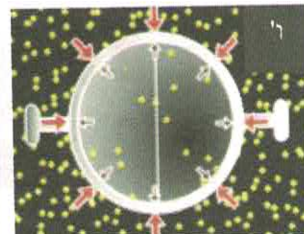
בהדגמה המפורסמת במיוחד שלו, בשנת 1650, הכין גריקה שני חצאי כדור (תרשים א'), כאשר שייף היטב את הקצוות שלהם כך, שניתן היה להצמיד אותם ולקבל מיכל כדורי, ללא רווח הנראה לעין בין החצאים.

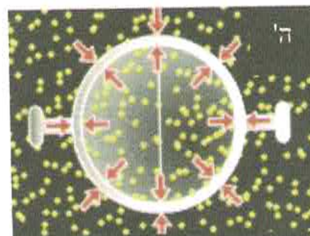
פון גריקה שאב אוויר מתוך מיכל זה (תרשים ב') וראה, שבעקבות הפעולה הוצמדו חצאי כדור זה לזה כה חזק, שלא ניתן היה להפריד ביניהן (תרשים ג'). בהדגמה המפורסמת ניסו 16 סוסים, שמונה מכל צד, להפריד בין החצאים, ולא הצליחו (תרשימים ד', ז').







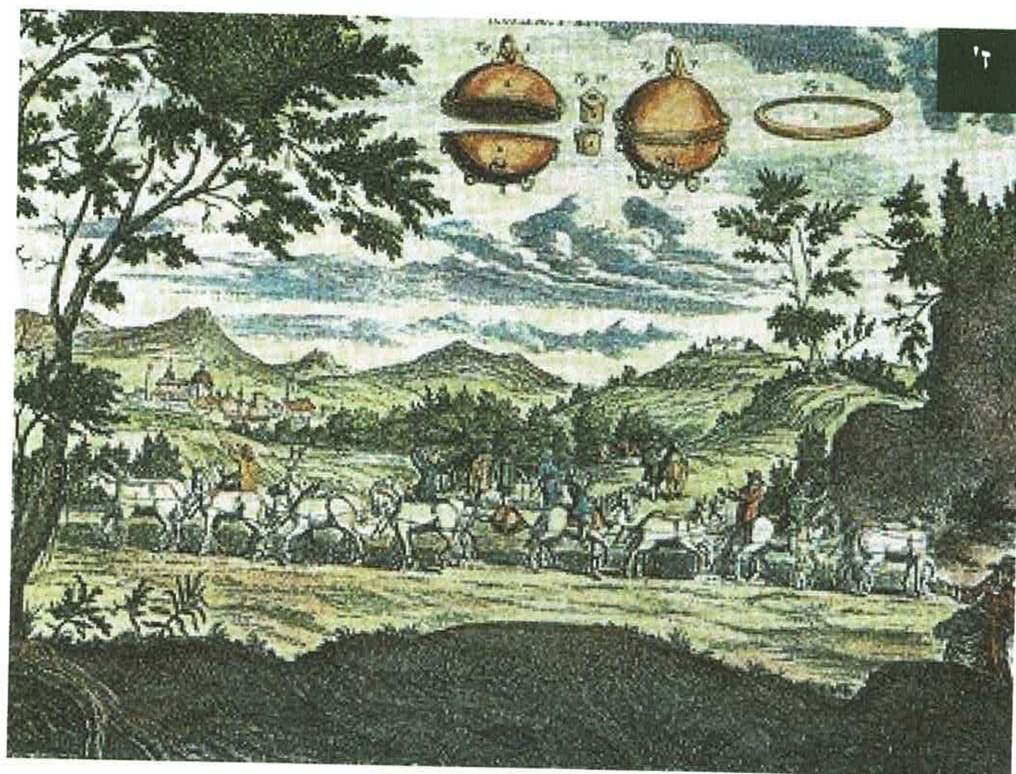






ההסבר היה פשוט. כאשר היה אוויר בין החצאים, הלחץ האטמוספרי פעל במידה שווה משני הצדדים של הדפנות (תרשים ה'), וקל היה להפריד בין שני החצאים. לאחר שסולק האוויר הוצמדו שני חצאי הכדור זה לזה על ידי כוח הלחץ האטמוספרי (כוח אירו סטאטי), כוח זה הפועל מבחוץ בלבד ובעוצמה גדולה הפך את הכדור לגוף "שלם" (תרשים ו') ולכן קשה היה להפריד בין החצאים.

ההדגמה הייתה מאוד מוצלחת, ורעיון הלחץ האטמוספרי התקבל בציבור הרחב.





1) חוק הלחץ ההידרוסטאטי חל על:

א. כלים שלובים, שמכילים שני נוזלים.

ב. כלים שלובים שמכילים מספר נוזלים.

ג. אינו חל על כלים שלובים.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

2) בכלים שלובים, המכילים מספר נוזלים:

א. גובה הנוזלים נמצא ביחס ישר למשקלם הסגולי.

ב. גובה הנוזלים שווה בכל הזרועות, על פי חוק הלחץ ההידרוסטאטי.

ג. גובה הנוזלים שווה בכל הזרועות, על פי חוק הכלים השלובים.

ד. גובה הנוזלים בזרועות נמצא ביחס הפוך למשקלם הסגולי של הנוזלים.

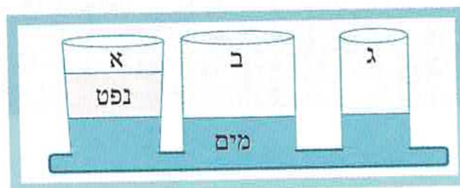
3) למערכת כלים שלובים, המכילה מים, יוצקים נפט,שמשקלו הסגולי קטן משל המים.
הנפט מגיע עד לגובה מסוים (ראה שרטוט).

א. גובה המים בכלים ב' ו- ג' יהיה קטן מגובה הנפט, הנמצא בכלי א'.

ב. גובה המים בכלים ב' ו- ג' יהיה שווה לגובה הנפט, שנמצא בכלי א'.

ג. גובה המים בכלים ב' ו- ג' יהיה גדול מגובה הנפט, שנמצא בכלי א'.

ד. גובה המים בכלי ב' יהיה גדול יותר מאשר בכלי ג'.



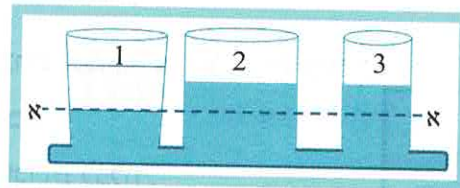
4) במערכת כלים שלובים מצוי נוזל בעל צפיפות ρ_1. דרך כלי 1 מוזגים נוזל נוסף, בעל צפיפות ρ_2, כך ש: $\rho_1>\rho_2$. כתוצאה מכך:

א. הלחץ בקרקעית יישאר שווה, על פי חוק הלחץ ההידרוסטאטי.

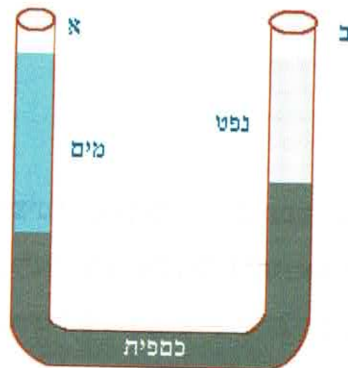
ב. הלחץ במישור המשותף (א-א) של הנוזלים יהיה שווה, על פי חוק הכלים השלובים.

ג. הלחץ בקרקעית כלי 1 יהיה קטן מהלחץ בקרקעית כלי 3.

ד. תשובות א' ו- ב' נכונות.



5) בקרקעיתו של צינור U מצויה כספית. דרך פתח א' מכניסים מים, ודרך פתח ב' מכניסים נפט. ידוע ש, $\rho_{כספית} > \rho_{מים} > \rho_{נפט}$. כאשר המים והנפט מגיעים לאותו גובה:



א. הכספית תהיה בגובה רב יותר בזרוע, בה מצוי הנפט.

ב. הכספית תהיה בגובה רב יותר בזרוע, בה מצויים המים.

ג. הכספית תהיה באותו גובה בשני צידי הצינור.

ד. לא ניתן לדעת, באיזו זרוע יהיה עמוד הכספית גבוה יותר.

6) צינור U מכיל בקרקעיתו כספית. דרך פתח א' מוזגים מים, ודרך פתח ב' מוזגים נפט ($\rho_{כספית} > \rho_{מים} > \rho_{נפט}$). כאשר משיגים גובה שווה של כספית משני הצדדים, זה אומר ש:

א. גובה המים וגובה הנפט שמעל הכספית זהים.

ב. הנפט נמצא בגובה רב יותר מאשר המים.

ג. המים נמצאים בגובה רב יותר מאשר הנפט.

ד. לא ניתן להגיע למצב, שבו גובה הכספית יהיה שווה בשתי זרועות הצינור.

7) מתחת לכיורים בבתים מחוברים הצינורות באופן, המתואר בשרטוט, כי:



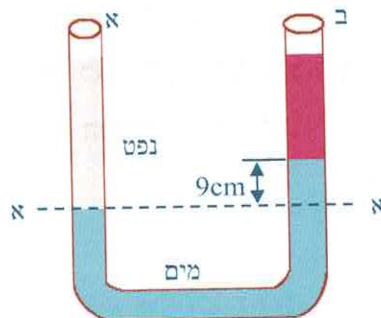
א. הדבר מונע הצטברות לכלוך.

ב. הדבר מאפשר זרימה מהירה ונוחה יותר של המים.

ג. בגלל מבנה זה מחזיק הצינור מעמד זמן רב יותר.

ד. כך נשארת בקרקעית כמות של מים, המונעת עליית ריחות מהביוב.

8) בצינור U נמצאים מים ונפט. גובה המים מעל המישור א- א הוא 9 ס"מ. מוזגים נוזל כלשהו דרך פתח ב', וכתוצאה מכך קטן גובה המים בצינור ב' ב- 2 ס"מ. האם נכון שגובה המים מעל המישור א- א החדש יהיה:



א. 7 ס"מ.

ב. 5 ס"מ.

ג. 2 ס"מ.

ד. 11 ס"מ.

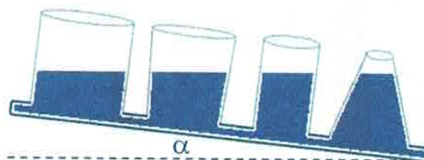
9) במערכת אופקית של כלים שלובים נמצא נוזל מסוים באותו גובה בכל הכלים.כאשר נטה את המערכת בזווית מסוימת α:

א. חוק הכלים השלובים ישמר.

ב. חוק הכלים השלובים יופר.

ג. רק עבור זווית a קטנה יישמר חוק הכלים השלובים.

ד. לא ניתן לדעת כיצד יתנהג הנוזל שבמערכת.



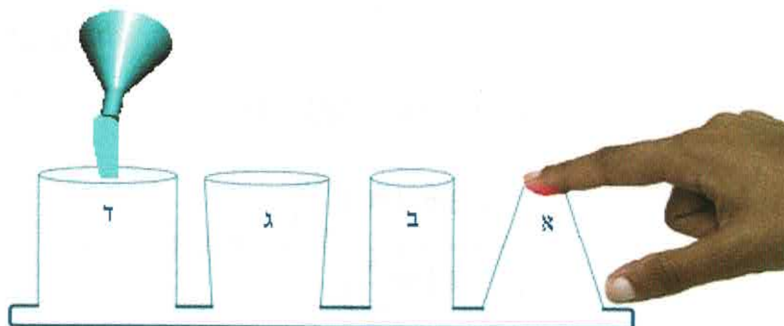
10)במערכת של כלים שלובים סותמים את פתח א' באצבע, ומוזגים נוזל דרך פתח ד'.

א. הנוזל בארבעת הכלים יגיע לאותו הגובה.

ב. הנוזל בכלי א' יגיע לגובה רב יותר מאשר בכלים ב', ג' ו- ד'.

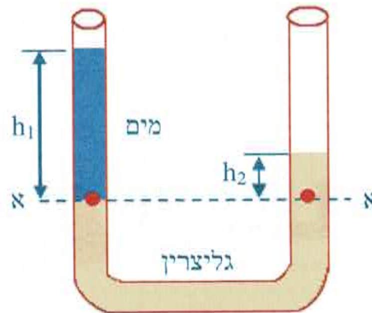
ג. גובה הנוזל בכלי א' יהיה קטן יותר מאשר בכלים ב', ג' ו- ד'.

ד. ניתן לדעת את היחס בין הגבהים של הנוזלים בהתאם לסוג הנוזל, שמוזגים.



דוגמה

בזרוע אחת של כלים שלובים נמצאים מים, ובשנייה- גליצרין. צפיפות המים היא $\rho_1=1000\frac{kg}{m^3}$. וצפיפות הגליצרין היא $\rho_1=1260\frac{kg}{m^3}$. אם ידוע שגובה עמוד המים הוא 0.32m, מה יהיה גובה עמוד הגליצרין?



פתרון:

אנו יודעים, שכאשר כלים שלובים מכילים כמה נוזלים, יחס הגבהים הפוך ליחס הצפיפויות, כלומר: מעל המישור המשותף א- א יהיה גובה עמוד המים, שצפיפותו קטנה מזו של הגליצרין, גדול יותר מגובה עמוד הגליצרין. עתה ניתן לשרטט:

נבטא את הלחץ בנקודות 1 ו-2, שמתחתן נמצא גליצרין בלבד:

$$p_1 = h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = h \cdot 1260 \cdot 10$$

$$p_2 = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g = 0.32 \cdot 1000 \cdot 10$$

נשווה אותם ונקבל:

$$h \cdot 1260 = 0.32 \cdot 1000$$

$$h = \frac{0.32m \cdot 1000\frac{kg}{m^3}}{1260\frac{kg}{m^3}} = 0.2539m$$

גובה הגליצרין הוא 25.39 ס"מ.



שאלות חישוב

1) לתוך זרוע אחת של צינור U, בו נמצאים מים ($\rho_{מים} = 1000\frac{kg}{m^3}$), מוסיפים נפט. שני הנוזלים מגיעים לידי שיווי משקל כאשר גובה המים מעל למישור המגע המשותף הוא 0.4m וגובה הנפט ממישור זה 0.5m . מהי צפיפות הנפט ?

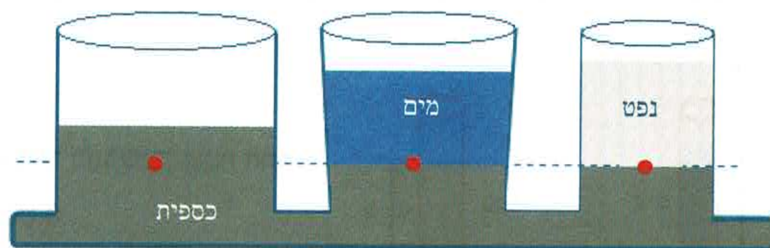
2) בכלים שלובים נמצאים שני נוזלים שונים. הצפיפות של אחד מהם $\rho = 800\frac{kg}{m^3}$, ושל השני $\rho = 1200\frac{kg}{m^3}$. באיזה יחס נמצאים גובהי הנוזלים ?

3) תחילה מזגו כספית ($\rho_1 = 13600\frac{kg}{m^3}$) לתוך שלושה כלים שלובים (תרשים). לאחר מכן הוסיפו לכלי השני נפט ($\rho_2 = 800\frac{kg}{m^3}$), ולכלי השלישי – מים ($\rho_3 = 1000\frac{kg}{m^3}$).

אם ידוע, שגובה הכספית בשני כלים אלה זהה, וגובה הנפט מעל לכספית הוא 0.52m, מצאו:

א. את גובה המים מעל לכספית בכלי השני.

ב. בכמה שונה גובה הכספית בכלי השלישי לעומת יתר הכלים?



4) אל תוך צינור U יוצקים כספית. לאחר מכן מזרימים לתוך זרוע אחת שמן ($\rho = 800\frac{kg}{m^3}$) עד גובה של 0.3m, ולזרוע השנייה מזרימים מים ($\rho = 1000\frac{kg}{m^3}$), עד שמתייצב גובה זהה של כספית בשתי זרועות הצינור. מהו גובה עמוד המים?

5) תחילה מזגו כספית לצינור U ($\rho_1 = 13600\frac{kg}{m^3}$). לאחר מכן הזרימו מים

1000) ($\rho_2 = \frac{kg}{m^3}$ לתוך זרוע אחת של הצינור, ונפט ($\rho_3 = 800\frac{kg}{m^3}$ לזרוע השנייה.

כאשר ההפרש בין רמות מפלסי הכספית בשתי הזרועות של הכלי היה 0.008m,

השתוותו המפלסים של שני הנוזלים האחרים בצינור. באיזה גובה נמצאים המים והנפט

מעל לכספית בצינור.

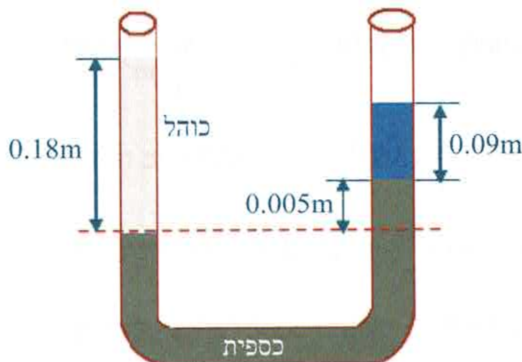
6) על סמך הנתונים שבתרשים מצאו

את צפיפות הכוהל, כאשר

ידועות צפיפויות הכספית והמים.

$\rho_{כספית} = 13600\frac{kg}{m^3}$

$\rho_{מים} = 1000\frac{kg}{m^3}$



7) צינור בצורת U מכיל כספית ($\rho_{כספית} = 13600\frac{kg}{m^3}$ עד גובה מסוים. שטח החתך של

הצינור הוא $0.00006\ m^2$. לזרוע אחת של הצינור מוזגים $0.00003\ m^3$ של כוהל

($\rho = 850\ \frac{kg}{m^3}$). מצאו את הפרש הגבהים של הנוזלים בשתי זרועות הצינור.

8) לצינור, המתואר בתרשים, שטח חתך

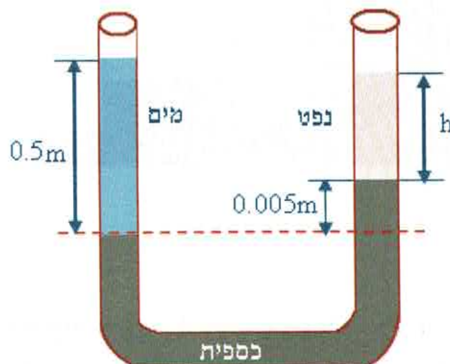
של $0.00005m^2$.

א. מצאו את גובה הנפט בצינור.

ב. מצאו איזו כמות של נפט יש להוסיף,

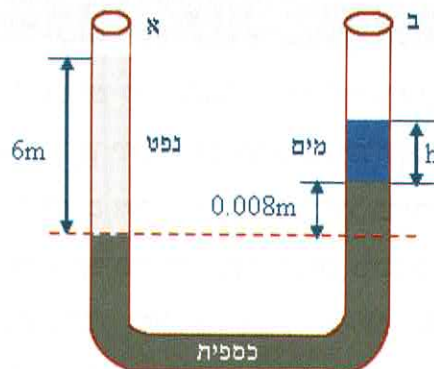
על מנת שישתוו מפלסי הכספית

בשני הזרועות.



נתונים : $\rho_{כספית} = 13600\frac{kg}{m^3}$, $\rho_{מים} = 1000\frac{kg}{m^3}$, $\rho_{נפט} = 800\ \frac{kg}{m^3}$.

9) מצאו על סמך הנתונים שבתרשים את גובה עמוד המים, שיש להוסיף, על מנת שהכספית תעלה ב-0.002m בזרוע א' (בו נמצא הנפט) של צינור U.



נתונים : $\rho_{\text{כספית}} = 13600\,\frac{kg}{m^3}$, $\rho_{\text{מים}} = 1000\,\frac{kg}{m^3}$, $\rho_{\text{נפט}} = 800\,\frac{kg}{m^3}$.

10) שטח החתך של צינור U הוא $0.00004m^2$. בתחתית הצינור נמצאת כספית. מוזגים לזרוע אחת של הצינור $0.00002\ m^3$ מים (20 סמ"ק), ולזרוע השנייה $0.00004m^3$ נפט (40 סמ"ק).

מצאו מה יהיה גובה הכספית מעל המישור המשותף.

נתונים : $\rho_{\text{כספית}} = 13600\,\frac{kg}{m^3}$, $\rho_{\text{מים}} = 1000\,\frac{kg}{m^3}$, $\rho_{\text{נפט}} = 800\,\frac{kg}{m^3}$.

תשובות

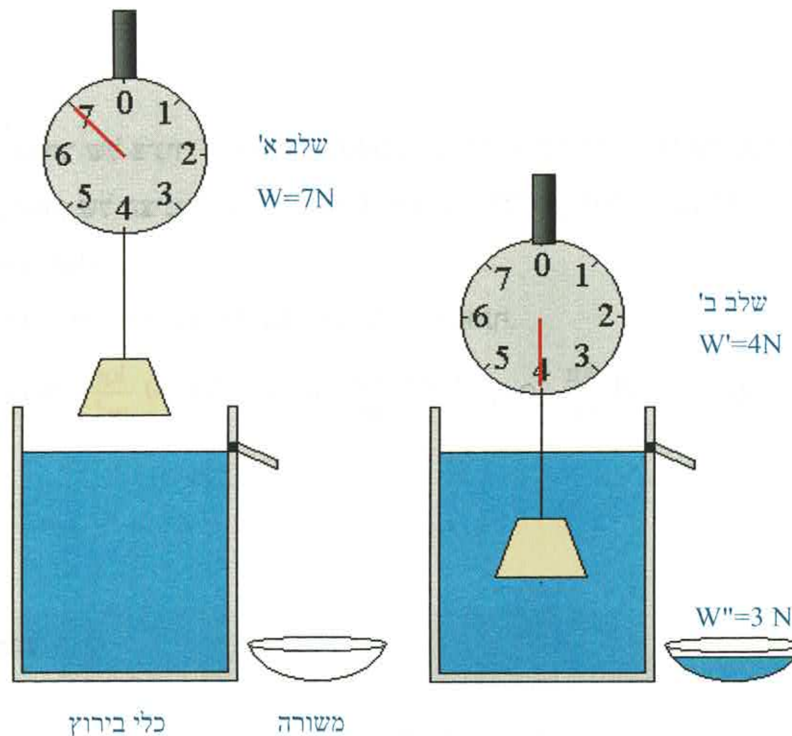
1) $800kg/m^3$ **2)** 1.5 **3)** א. 0.416m ב. 0.03m **4)** 0.24m

5) מים – 0.512m, נפט – 0.504m **6)** $877.7\ kg/m^3$ **7)** 0.468m

8) א. 0.54m ב. 0.034N **9)** 0.0544m **10)** 0.022m

וודאי שמתם לב לעובדה, שכאשר גופים שקועים בתוך מים, קל יותר להרימם, כאילו משקלם קטן יותר. גם אם נרצה לדחוף גלגל ים לתוך המים, נראה, שאין זה קל כל כך. אנו מפרשים זאת שעל הגוף, הטבול בתוך נוזל פועל כוח כלפי מעלה.

נלמד על כוח זה בניסוי הבא: ניקח משקולת ובעזרת מד כוח נמדוד את משקלה (שלב א' בתרשים). נסמן את משקלו ב-W. הערך שקיבלנו היה 7N. לאחר מכן ניקח כלי בירוץ, שהוא מעין קנקן, המכיל זרוע צדדית, ונמלא אותו מים בדיוק עד לגובה של פתח יציאת המים. נטבול בתוכו את הגוף (שלב ב' בתרשים). בעקבות הטבילה ייצאו מים דרך הזרוע הצדדית של כלי הבירוץ, ואותם נאסוף במשורה נפרדת.



את "משקל" הגוף, כאשר כולו טבול בכלי הבירוץ, נסמן ב-W'. קיבלנו 4 N. נשקול גם את המים, שיצאו מהכלי ונאספו במשורה, ואת משקלם נסמן ב-W'. קיבלנו 3 N. כלומר, קיבלנו הפחתה בתוצאת השקילה (ולכן גם בגודל הכוח, התומך במשקולת כאשר היא טבולה במים), השווה למשקל המים, שנדחו על ידי המשקולת בטבילתה.

$$W_{[\text{משקל הגוף באוויר}]} = W'_{[\text{משקל הגוף הטבול במים}]} + W''_{[\text{משקל הנוזל שנדחה}]}$$

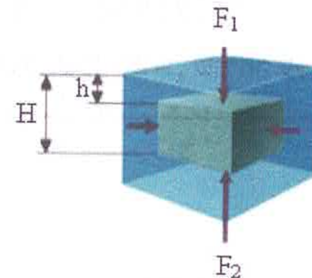
נוכל אם כך להסיק ש:

על גוף, הטבול בנוזל, פועל כוח עילוי (הכוח התומך בו) בגודל, השווה למשקל הנוזל, הנדחה על ידי הגוף.


ארכימדס
212 – 287 לפני הספירה

למבצע השקילה נראה הדבר, כאילו הגוף, הטבול בנוזל, מאבד ממשקלו במידה השווה למשקל הנוזל, שנדחה על ידי המשקולת. כלל זה ידוע בפיסיקה בשם **חוק ארכימדס**.

כאמור, ניתן לפרש את "ההפחתה" במשקל כקיום כוח, הפועל מצד הנוזל על הגוף, הטבול בו. כוח עילוי זה נקרא **כוח ארכימדס**.



נקבל את גודל כוח העילוי ללא שקילה. לשם כך ניקח גוף בצורת תיבה, ונטבול את כולו בנוזל (תרשים). נוכל לחשב את הכוח ההידרוסטאטי, הפועל על התיבה מצד הנוזל.

בסביבת הקרקעית של התיבה שורר לחץ ההידרוסטאטי בגודל $H \cdot d'$, כאשר d' הוא המשקל הסגולי של הנוזל. לפי חוק פסקל, פועל לחץ זה לכל הכיוונים. לכן ניתן לטעון, שעל קרקעית התיבה כולה (שטח A) הופעל מצד הנוזל כוח כלפי מעלה, שגודלו:

$$F_2 = H \cdot d' \cdot A = H \cdot g \cdot \rho' \cdot A \qquad (1)$$

באותו אופן ניתן לחשב את הכוח ההידרוסטאטי, הפועל על המשטח העליון של התיבה מצד הנוזל. כוח זה פועל כלפי מטה ושווה:

$$F_1 = h \cdot d' \cdot A = h \cdot g \cdot \rho' \cdot A \qquad (2)$$

על התיבה פועלים מצד הנוזל גם כוחות בצדדים, אך קל לראות, שלכל כוח כזה, הפועל על שטח מסוים של הקובייה, קיים כוח בכיוון ההפוך, הפועל מצידה השני של הקובייה. כוחות אלה שווים בגודל, כי הם נוצרים עקב הלחץ, השורר בנוזל בעומק זהה.

מכאן, שסכום הכוחות ההידרוסטאטיים, הפועלים על הדפנות הצדדיות של התיבה, מתאפס. לכן, הכוח הכולל על הקובייה מצד הנוזל שווה להפרש הכוחות F_2 וכוח F_1:

$$F = F_2 - F_1$$

לאחר ההצבה של ביטויים (1) ו- (2) מקבלים את הביטוי עבור כוח העילוי על התיבה:

$$F = (H-h) \cdot A \cdot g \cdot \rho\,' = V \cdot d' = W''_{[\text{משקל המים שנדחו על ידי הגוף}]}$$

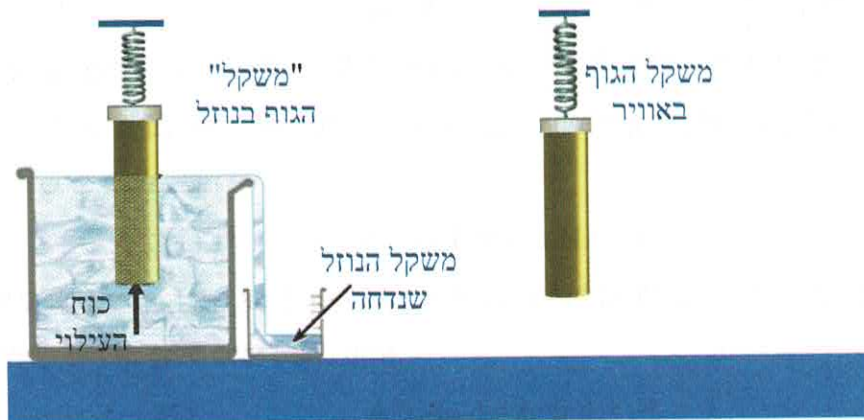
V הוא נפח התיבה. כך אישש‌נו את תוצאת הניסוי, בו התחלנו את הפרק.



על כל גוף, הטבול בתוך נוזל, פועל מצד הנוזל כוח עילוי (כוח ארכימדס), שגודלו שווה למשקל הנוזל שנדחה.

נזכיר, שניתן לפגוש את **חוק ארכימדס** בשני ניסוחים שקולים:

1. גוף, השקוע בתוך נוזל, "מאבד" ממשקלו כמשקל הנוזל, שנדחה על ידו.
2. על גוף, השקוע בתוך נוזל, פועל כוח עילוי, השווה למשקל הנוזל, שנדחה על ידו.





לגילוי החוק מלבד היותו מעניין קשור סיפור, אשר כולל פרטים, החשובים לנו. מספרים, שלמלך העיר סיראקוזה שבסיציליה הכינו כתר חדש, כולו זהב. המלך הכיר כנראה את משרתיו וחשד, שהכתר אינו עשוי מזהב טהור. כיצד ניתן לבדוק את הדבר ללא הריסת הכתר? את המשימה הטיל המלך על המדען המפורסם, שגר בעירו – ארכימדס.

תחילה נבין את קושי המשימה: ניתן בקלות לשקול את הכתר, אך אין להסיק מכאן על החומר, ממנו הוא עשוי, אך לפי ארכימדס, כל חומר מאופיין על ידי הצפיפות (המסה הסגולית) שלו, ועל מנת לדעת את הצפיפות, יש לקבוע גם את המשקל וגם את הנפח של הגוף, ממנו עשוי החומר.

מציאת נפחו של גוף, שאינו בעל צורה פשוטה, כמו תיבה, היא בעיה קשה במיוחד, למי שרגיל לפתור בעיות באופן תיאורטי, כמו למשל, על ידי הנוסחה: נפח שווה למכפלה של אורך, גובה ורוחב. אך לכתר צורה מורכבת ביותר, ואין שום סיכוי לפתח נוסחה מדויקת. כאן גילה ארכימדס את הגאוניות שלו גם כפיזיקאי.



מספרים, שזה קרא לו, כשהתיישב באמבטיה מלאה מים, ושם לב לכך, שהמים נשפכו החוצה. בהברקה גאונית ופשוטה בו זמנית הבין ארכימדס, שנפח המים, שנשפכו, שווה בדיוק לנפח גופו. מספרים, שצעק בהתרגשות רבה "אאוריקה", שפירושה "מצאתי", ורץ ערום מבית המרחץ הביתה כדי להשלים את הבדיקה.

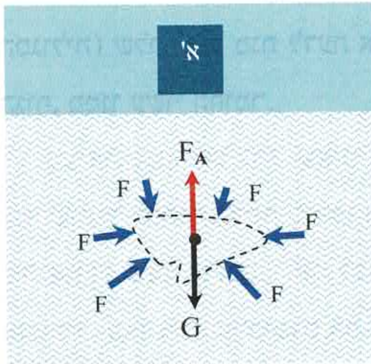


ארכימדס לא הסתפק בחישוב אפשרי ופשוט של הצפיפות על ידי חלוקה של משקל בנפח, אלא ארגן הצגה מרשימה. הרעיון השני היה מבריק לא פחות. ארכימדס הבין, שנפח הגוף קובע את חוק העילוי בטבילה מלאה (החוק שלו!), ומכאן, אותה כמות החומר (משקל או מסה) של זהב טהור כמו בכתר, צריכה לגרום לאותו כוח עילוי. אך אם החומר, ממנו עשוי הכתר, אינו זהב טהור, נפח אותה כמות של החומר יהיה

שונה, ולכן ישתנה כוח עילוי. וכך עשה ארכימדס, כאשר התייצב מול המלך. הוא ביקש מאזני כפות, ושם כתר על כף אחת. על הכף השנייה ביקש לשים זהב בכמות הדרושה לאיזון עם הכתר. כאשר הושג האיזון, טבל את המאזנים בתוך המים. איזון המאזנים הופר... הכתר לא היה עשוי זהב טהור! מבחינת הפיזיקה זהו סוף הסיפור.

חוק ארכימדס ללא ניסוי וללא חישוב

לסיום נראה, שחוק ארכימדס מובן בעצם ללא ניסוי או ללא חישוב כלשהו. גישה זו לבעיות ידועה בפיזיקה בשם ניסוי מחשבתי.



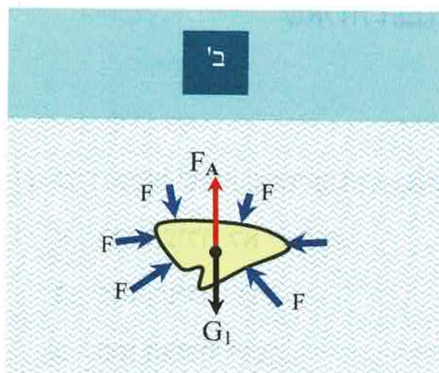
נדמיין כלי ובו מים. עתה נדמיין, שחלק מן המים מהווה גוף נפרד (תרשים). לגוף זה משקל של המים, שנכללו בתוך הגבולות שדמיינו (הקו המרוסק בתרשים א'). על הגוף מופעלים הכוחות ההידרוסטאטיים מצד הסביבה (אלה סומנו ב-F בתרשים). הם רבים ומכוונים בכיוונים שונים במאונך לגבולות הגוף. בנוסף, פועל על הגוף כוח הכבידה, ויותר מדויק, הכוח פועל על כל טיפת מים בתוכו.

כוחות אלה ניתן לסכם לכוח אחד – G, שפועל כלפי מטה.

עתה, על סמך חוקי ניוטון נוכל לטעון, שאם הגוף מצוי במנוחה (הרי המים אינם זזים), סכום הכוחות על הגוף מתאפס. עובדה זו מכוונת אותנו לסכם גם את כל הכוחות ההידרוסטאטיים על הגוף לכוח אחד, ולטעון, שכוח זה חייב להיות כלפי מעלה על מנת לאזן את כוח הכבידה G.

כוח זה הוא כוח העילוי, או כוח ארכימדס – F_A. כלומר, הגענו למסקנה, שעל הגוף המדומה, הכולל כמות מסוימת של מים, הופעל כוח עילוי בגודל של משקל המים, שבגבולות של הגוף:

$$F_A=G$$



נשאר לנו לדמיין, שבמקום גוף מדומה ממים נשים גוף, העשוי מחומר כלשהו אחר. מה ישתנה במצב זה? ישתנה כוח הכבידה ויהיה עתה G_1, אך דבר לא השתנה מבחינת הסביבה של הגוף, הכוחות F, אשר ידענו, שהם מסתכמים לכוח העילוי – F_A. כמובן, עתה לא נוכל לטעון, שקיים שוויון בין כוחות העילוי והכבידה, אך אין זה משנה את המסקנה, שהיא מהווה את חוק ארכימדס:



על כל גוף, הטבול בתוך נוזל, מופעלים מצד הנוזל כוחות הידרוסטאטיים, אשר מסתכמים בכוח עילוי, (כלומר כוח המכוון כלפי מעלה) השווה למשקל המים, שהוחלפו על ידי הגוף

נשים לב, שבמסקנה זו לא מדדנו ולא חישבנו. הסתמכנו רק על העקרונות הבסיסיים של הפיזיקה. גם דרך זו, **בנוסף לדרכי ניסוי מבוקר**, אפשרית בפיזיקה, ובזה עוצמתה הגדולה. משום כך שואפים פיזיקאים לגילוי חוקים כלליים ובסיסיים לגבי הארגון החוקי של הטבע. ידע זה מאפשר להסיק על קיום החוקים, הנושאים אופי ייחודי יותר. במקרה שטיפלנו התבססנו על חוקי התנועה באופן כללי (או, למעשה, על חוקי ניוטון, אם מנסחים אותם יותר מדויק), והסקנו לגבי המצב הייחודי של הגופים, הטבולים בתוך נוזלים.

שאלה מסכמת לתלמיד



נתונים שלושה כדורים, העשויים מחומרים שונים (הצפיפויות שלהם ביחס $\rho_1>\rho_2>\rho_3$), ובעלי נפח זהה. את שלושת הכדורים טובלים בתוך מים.

א. משקלו של איזה כדור גדול יותר באוויר?
ב. על איזה כדור פועל כוח עילוי גדול יותר?
ג. איזה כדור ידחה משקל גדול יותר של מים?
ד. משקלו של איזה כדור גדול יותר במים?



1) כדור ברזל שקוע בתוך בנזין. כאשר יוסיפו בנזין לכלי:

א. כוח העילוי לא ישתנה.

ב. כוח העילוי יגדל.

ג. כוח העילוי יקטן.

ד. תלוי בגובה שכבת הבנזין שנוסיף.

2) כוח העילוי, הפועל על גוף, השקוע בנוזל שווה בגודלו לנפח הגוף. עובדה זו:

א. אינה נכונה בשום מקרה.

ב. נכונה רק לגבי מים.

ג. תלוי מה נפחו של הגוף.

ד. כל התשובות אינן נכונות.

3) גוף טבול כולו בתוך נוזל. כאשר נשקיע אותו עמוק יותר:

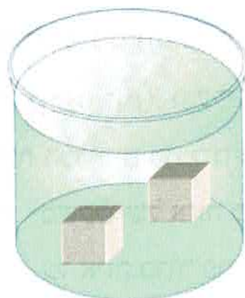
א. כוח העילוי יגדל.

ב. כוח העילוי יקטן.

ג. כוח העילוי לא ישתנה.

ד. תלוי באיזה נוזל טבול הגוף.

4) שתי קוביות זהות, העשויות עופרת, שקועות בתוך מים, כל אחת בעומק שונה (כמתואר בשרטוט). האם נכון ש:



א. שתי הקוביות דוחות אותה כמות של מים ?

ב. הקובייה התחתונה דוחה כמות מים גדולה יותר מאשר הקובייה העליונה ?

ג. הקובייה העליונה דוחה כמות מים גדולה יותר מאשר התחתונה ?

ד. לא ניתן לדעת איזו קובייה דוחה יותר מים, כי לא ידוע העומק ?

5) מה קל יותר להחזיק: דלי ריק **באוויר**, או אותו דלי מלא במים **בתוך המים**?

א. דלי ריק באוויר.

ב. דלי מלא במים בתוך המים.

ג. אין כל הבדל.

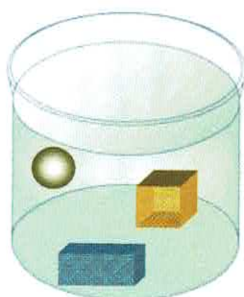
ד. תלוי מהו נפח הדלי.

6) מדדו את משקלו של גוף באוויר ואחר כך בתוך מים, כמתואר בשרטוט. מה תהיה תוצאת השקילה בתוך כוהל, שצפיפותו: $900\frac{kg}{m^3}$?



א. 0.6N ב. 0.18N ג. 0.98N ד. 0.62N

7) שלושה גופים, העשויים מחומרים שונים, טבולים בעומקים שונים בתוך נוזל, כמתואר בשרטוט. כוח העילוי הגדול ביותר פועל על



א. גוף א'.

ב. גוף ג'.

ג. על הגוף שמשקלו הוא הגדול מבין השלושה.

ד. על הגוף שנפחו הוא הגדול מבין השלושה.

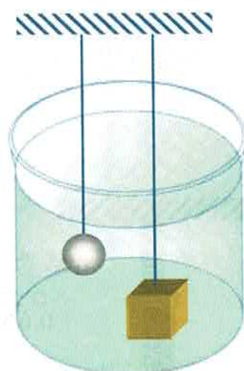
8. בתוך כלי, המכיל נפט, טבולים שני גופים , כדור וקובייה, העשויים מאותו חומר, ובעלי אותו משקל , כמתואר בשרטוט.

א. כוח העילוי על הכדור גדול יותר.

ב. כוח העילוי על הקובייה גדול יותר.

ג. על הגופים פועל אותו כוח עילוי.

ד. לא ניתן לדעת, על איזה גוף פועל כוח עילוי גדול יותר.



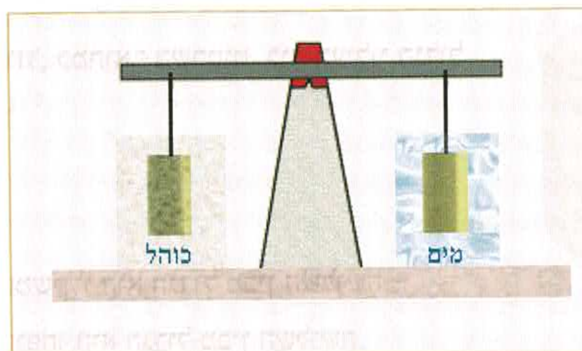
9. שני גופים זהים תלויים על שתי זרועות שוות במאזניים. אם נטבול את הגופים, אחד בתוך מים והשני בתוך כוהל, שמשקלו הסגולי קטן משל המים,

ה. שיווי המשקל יישמר.

ו. הזרוע שבצד הכוהל תעלה.

ז. הזרוע שבצד המים תעלה.

ח. רק אם יהיו נתונים משקלי הגופים, נוכל לדעת, איזו זרוע תעלה.



דוגמה

קובייה, שאורך צלעה 0.1m, שקועה בתוך כלי, ובו מים. הדופן העליון של הקובייה נמצא בעומק של 0.2 m מתחת לפני המים.



א. איזה כוח מפעיל הנוזל על החלק העליון של הקובייה ?

ב. איזה כוח מפעיל הנוזל על החלק התחתון של הקובייה ?

ג. מהו כוח העילוי, הפועל על הקובייה ?

ד. מהו משקל המים הנדחים ?

פתרון:

א. כוח הידרוסטאטי פועל על החלק העליון של הקובייה, על שטח A של הדופן:

$$A = 0.1m \cdot 0.1m = 0.01\ m^2$$

גובה עמוד הנוזל מעל הקובייה $h = 0.2m$, וצפיפות הנוזל $\rho' = 1000\frac{kg}{m^3}$.

לכן הכוח F_1, הפועל על הדופן העליון הוא:

$$F_1 = h \cdot g \cdot \rho' \cdot A = 0.2m \cdot 0.01m^2 \cdot 10\frac{m}{sec^2} \cdot 1000\frac{kg}{m^3} = 20N$$

ב. על הדופן התחתון של הקובייה, המצוי בעומק: $H = 0.2m + 0.1m = 0.3m$

פועל הכוח ההידרוסטאטי:

$$F_2 = H \cdot g \cdot \rho' \cdot A = 0.3m \cdot 10\frac{m}{sec^2} \cdot 0.01m^2 \cdot 1000\frac{kg}{m^3} = 30\ N$$

ג. כוח העילוי הוא ההפרש בין הכוחות שחישבנו:

$$F_A = F_2 - F_1 = 30N - 20N = 10N$$

או אחרת:

$$F_A = (H - h) \cdot g \cdot \rho' \cdot A = (0.3m - 0.2m) \cdot 10\frac{m}{sec^2} \cdot 1000\frac{kg}{m^3} \cdot 0.01m^2 = 10N$$

ד. משקל המים הנדחים שווה לכוח העילוי:

$$F_A = G = 10N$$

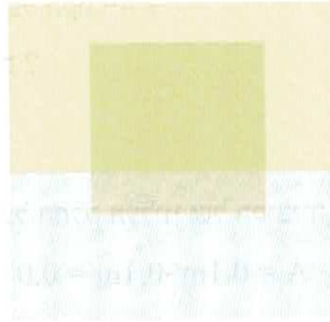
או:

$$V = 0.1m \cdot 0.1m \cdot 0.1m = 0.001m^3$$

$$G' = V \cdot \rho' = 0.001m^3 \cdot 1000\frac{kg}{m^3} = 10N$$

דוגמה

בתוך כלי, בו מצויים מים ושמן, מרחפת קוביית עץ, שאורך צלעה 0.08m. גובה שכבת השמן 0.1m, והקובייה נמצאת 0.02m מתחת לשטח המגע בין המים לשמן. ידוע, שצפיפותו של השמן היא $600\frac{kg}{m^3}$. כמה "מאבדת" הקובייה ממשקלה בתוך הנוזלים?



פתרון:

נמצא תחילה את הפחתת משקל הקובייה בתוך השמן, אם גובה הקובייה 0.08m, ו-0.02m מהגובה נמצאים בתוך המים,אזי, גובה הקובייה בשמן יהיה 0.06 m.

נפח חלק הקובייה, שנמצא בשמן:

$$V'_1 = A\cdot h = 0.06\ m\cdot 0.08\ m\cdot 0.08\ m = 0.000384\ m^3$$

היות וצפיפות השמן $\rho_1' = 600\frac{kg}{m^3}$, הקובייה "מאבדת" ממשקלה:

$$G_1' = \rho'_1\cdot g\cdot V'_1 = 600\frac{kg}{m^3}\cdot 10\frac{m}{sec^2}\cdot 0.000384\ m^3 = 2.304N$$

נמצא את הפחתת המשקל של הקובייה הודות לטבילה במים.

נפח חלק הקובייה, שנמצא במים, הוא:

$$V'_2 = A\cdot h = 0.02\ m\cdot 0.08\ m\cdot 0.08\ m = 0.000128\ m^3$$

היות וצפיפות המים היא: $\rho_2' = 1000\frac{kg}{m^3}$ נקבל עבור הפחתת המשקל במים:

$$G_2' = \rho'_2\cdot g\cdot V'_2 = 1000\frac{kg}{m^3}\cdot 10\frac{m}{sec^2}\cdot 0.000128\ m^3 = 1.28\ N$$

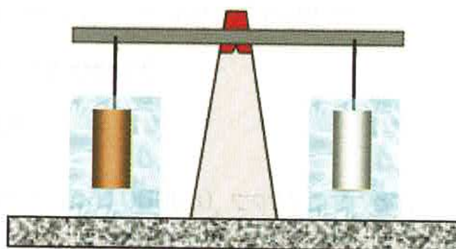
ההפחתה הכוללת במשקל הקובייה:

$$G' = G_1' + G_2' = 2.304N + 1.28N = 3.584N$$

דוגמה

על שתי זרועות מאזניים (תרשים) תלויים שני גופים שמשקלם במנוחה 17N.

גוף א' עשוי ברזל, שצפיפותו $\rho = 7800 \frac{kg}{m^3}$, גוף ב' עשוי פליז, שצפיפותו $\rho = 8400 \frac{kg}{m^3}$. האם יופר איזון המאזניים, במצב בו שני הגופים שקועים במים?



פתרון:

תחילה נמצא את נפחו של הגוף, העשוי ברזל, שמשקלו 17N. היות וצפיפות הברזל היא $\rho = 7800 \frac{kg}{m^3}$ נקבל, שנפחו:

$$V = \frac{G}{d} = \frac{G}{\rho \cdot g} = \frac{17N}{10\frac{m}{sec^2} \cdot 7800\frac{kg}{m^3}} = 0.0002179m^3$$

זהו נפח המים, הנדחה עלי ידי הגוף. כוח העילוי מצד המים בעקבות כך יהיה:

$$F_{A1} = \rho \cdot g \cdot V = 0.0002179m^3 \cdot 10\frac{m}{sec^2} \cdot 1000\frac{kg}{m^3} = 2.179N$$

בדומה נמצא את הנפח של הגוף, העשוי פליז:

$$V = \frac{G}{d} = \frac{G}{\rho \cdot g} = \frac{17N}{10\frac{m}{sec^2} \cdot 8400\frac{kg}{m^3}} = 0.0002023m^3$$

זהו נפח המים, שנדחו על ידי הגוף העשוי מפליז. כוח העילוי מצד המים בעקבות כך יהיה:

$$F_{A2} = V \cdot \rho' \cdot g = 0.0002023\ m^3 \cdot 10\frac{m}{sec^2} \cdot 1000\frac{kg}{m^3} = 2.023\ N$$

קיבלנו, שכוחות העילוי אינם שווים. לכן המאזניים ייצאו מאיזון.



שאלות חישוב

1) בתוך כלי מלא נוזל, שצפיפותו $\rho = 800\frac{kg}{m^3}$, טבולה קובייה, שאורך צלעה 0.06m.

הקובייה נמצאת בעומק של 0.3m מתחת לפני הנוזל.

א. חשבו את הכוח, שפועל על החלק העליון של הקובייה.

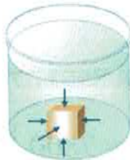
ב. חשבו את הכוח, שפועל על החלק התחתון של הקובייה.

ג. מהו כוח העילוי, הפועל על הקובייה?

ד. מהו משקל הנוזל שנדחה?

2) זכוכית, שמשקלה 0.4N ונפחה $0.000016m^3$, שקעה בתוך מים ($\rho = 1000\frac{kg}{m^3}$), מה "משקלה" בתוך המים.

3) משקלו של גוף באוויר 10N, והוא דוחה מים במשקל של 5N.



א. מצא את "משקלו" של הגוף, כשהוא טבול בתוך מים.

ב. מהו נפחו של הגוף?

ג. מה משקלו הסגולי של הגוף?

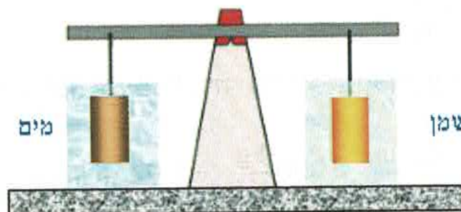
ד. מה גודלו של כוח העילוי, הפועל על הגוף?

4) משקלו באוויר של כדור נחושת הוא 1.8N, ובתוך מים הכדור שוקל 1.4N. האם הכדור הוא מלא או חלול? ($\rho_{מים} = 1000\frac{kg}{m^3}$, $\rho_{נחושת} = 8900\frac{kg}{m^3}$).

5) גוף נחושת, שצפיפותו $8900\frac{kg}{m^3}$, וגוף פליז שצפיפותו $7200\frac{kg}{m^3}$, תלויים על זרועות מאזניים, כמתואר בתרשים. משקלו של כל גוף 5N. טובלים את הנחושת במים ואת הפליז בשמן, שצפיפותו $900\frac{kg}{m^3}$.

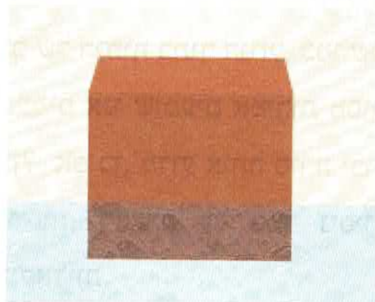
א. האם שיווי המשקל יופר ? נמקו ללא חישוב.

ב. מה גודלו של כוח העילוי שיפעל על כל אחד מהגופים?



6) אם ידוע ש"משקלו" של גוף בתוך מים קטן פי 6 ממשקלו באוויר, מהי צפיפותו של הגוף? ($\rho_{\text{מים}}=1000\frac{kg}{m^3}$).

7) משקלו של גוף באוויר 0.5N, בתוך מים "משקלו" 0.45N, ובתוך שמן 0.46N. מהי צפיפות השמן?



8) קובייה, שאורך מקצועה 0.12m , שקועה חלקית בתוך שמן וחלקית בתוך מים, כמתואר בתרשים. גובה חלק הקובייה שבתוך השמן 0.08m . אם ידוע, שצפיפותו של השמן $800\frac{kg}{m^3}$, ושל המים – $1000\frac{kg}{m^3}$, מצאו את הפחתת המשקל של הקובייה, כשהיא מרחפת בשני הנוזלים.

9) נתון נתך זהב ואלומיניום. משקלו של הנתך באוויר 0.5 N ובתוך מים 0.392N. אם צפיפות הזהב היא $19300\frac{kg}{m^3}$ ושל האלומיניום – $2500\frac{kg}{m^3}$, מהו משקל הזהב שבנתך? (עם בעיה דומה התמודד ארכימדס, כאשר ניסח את החוק הנושא את שמו).

10) גוש עופרת שוקל בתוך מים 0.5N. משקלו של בול עץ באוויר הוא 0.4 N. שני הגופים קשורים ביחד, טובלים במים ושוקלים אותם. תוצאת השקילה היא 0.34 N. מצאו את צפיפות העץ.

תשובות

1) א. 8.64N ב. 10.368N ג. 1.728N ד. 1.728N

2) 0.24N **3)** א. 5N ב. $0.0005m^3$ ג. $2000\ kg/m^3$ ד. 5N

4) חלול (מתקבל $\rho = 4500\ kg/m^3$)

5) א. יופר, ב. נחושת - 0.561N, פליז - 0.625N

6) $1200\ kg/m^3$ **7)** $800\ kg/m^3$ **8)** 14.976N

9) 0.264N זהב, 0.235N כסף.

10) $\rho_{\text{עץ}} = 714.2\ kg/m^3$.

פרק כ"ז - שקיעה, ציפה ורחיפה

כאמור, על כל גוף, הטבול בנוזל, פועל כוח עילוי, השווה בגודלו למשקל הנוזל, הנדחה על ידי הגוף. אי לכך, עבור גופים מוצקים, השקועים בתוך נוזל זה או אחר, ייתכנו מצבים שונים. ידוע לכולם, שגופים **שוקעים** או **טובעים** בתוך הנוזל, או **צפים** על פניו. קיים גם מצב של **ריחוף** בתוך הנוזל, כמו של גופים באטמוספרה. מה קובע את סוג ההתנהגות?

לפעמים אנו שומעים אמירות מסוג "הדברים הכבדים שוקעים, והקלים צפים", האם זה נכון? אם כן, מדוע אותה סירה יכולה גם לצוף וגם לשקוע? לכך מצאו האנשים תשובות מדויקות, ראשית על סמך ניסיון של אלפי שנים, ושנית במסגרת של תיאוריות פיזיקאליות.

התברר, שהגורמים המשפיעים הם צורת הגוף ומבנהו, וכמובן גם צפיפות החומר. נבדוק את בסיס הידע לסוגיה מורכבת זו, ולשם כך נלך מהפשוט למורכב יותר.

א. שקיעה

אם ניקח כדור מתכת, עשוי ברזל למשל, ונזרוק אותו לתוך המים, התוצאה ידועה: הכדור ישקע ויגיע לקרקעית הכלי. הוא אמנם "איבד" ממשקלו, כביכול, אך עם זאת, כוח הכובד גבר על כוח העילוי, ולכן הכדור **שקע**. במונחים של הכוחות, המצב מיוצג על ידי אי-השוויון:

$$F_{\text{עילוי}} < F_{\text{כוח הכובד}} \qquad (1a)$$

או כפי ציינו:

$$F_A < G \qquad (1b)$$

כפי שלמדנו, כוח הכובד G משתווה למשקל- מנוחה W. מכאן ניתן לבטא תנאי (1) גם במונחים של משקל:

$$F_A < W \qquad (1c)$$

כאשר גוף אחיד מבחינת החומר שקוע כולו בתוך הנוזל את תנאי (1c) ניתן לבטא באמצעות צפיפות הנוזל (הרי ש: $F_A=\rho' \cdot g \cdot V$) וצפיפות הגוף (הרי ש: $W=\rho \cdot g \cdot V$). בתנאים אלה ניתן לרשום תנאי לשקיעה של גוף ברזל:

$$\rho > \rho' \qquad (2)$$

תנאי (2) נראה פשוט מאוד ומעיד על הכלל:

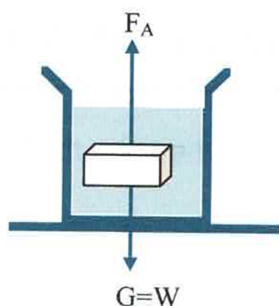


גוף, העשוי מחומר, הצפוף מהנוזל ישקע בו, ולהפך, אם החומר של הגוף פחות צפוף מזה של הנוזל, כמו במקרה של עץ ומים. הגוף לא ישקע.

זה אכן כלל פשוט, אך לא תמיד נכון. כידוע, ספינות עשויות ממתכת, אך הן אינן שוקעות, בדרך כלל. הסיבה, שקיבלנו תנאי, שמזכיר רק את הצפיפות, היא, שתוך כדי קבלת הביטוי הנחנו, שהגוף הוא אחיד, כלומר אינו כולל חומרים שונים וחללים בתוכו. לעומת זאת, כל כלי שייט, חוץ מרפסודה, לא עונה על תנאי זה. על כך נרחיב בהמשך.

ב. ציפה

אם ניקח תיבה עשויה עץ ונטבול אותה במים, נגלה, שעלינו להשקיע מאמץ כדי לגרום לשקיעתה. כאשר נשחרר את התיבה, היא תעלה במהירות אל פני המים למצב, בו היא שקועה רק חלקית בתוך הנוזל. מצב זה מכונה ציפה. נסביר אותו במונחים של כוחות:



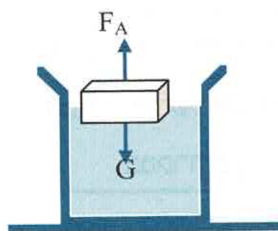
כשגוף צף על פני המים, סכום הכוחות, הפועלים עליו, שווה לאפס. נניח, שגוף העץ שקוע בתוך המים. כידוע, מצד הנוזל פועל על הגוף כוח עילוי בגודל של: $F_A = V\cdot \rho'\cdot g$ (V הוא נפח המים שנדחו ו-ρ' הצפיפות של המים). מנגד, פועל על הגוף כוח הכובד, השווה למשקל מנוחה W של התיבה:

$$G = W = \rho\cdot g\cdot V \qquad (3)$$

ρ – צפיפות העץ. היות וצפיפות זו קטנה מצפיפות המים ρ', כוח העילוי גדול יותר ממשקל התיבה ($G < F_A$), והתיבה מזנקת כלפי מעלה.



תיבת העץ תתייצב על פני המים, אך עד לאיזה עומק היא תשקע?



על פי חוק ארכימדס, כוח העילוי נקבע על ידי כמות המים, שנדחו על ידי הגוף. כאשר התיבה צפה על פני המים, ורק חלק ממנה, נפח 'V, שקוע בתוך המים, נוצר מצב בו כוח העילוי F_A הוא:

$$F_A = \rho' \cdot g \cdot V' \qquad (4)$$

משתווה למשקל הגוף:

$$W = \rho \cdot g \cdot V \qquad (5)$$

מן השוויון בין הכוחות האלה נקבל:

$$F_A = W \quad \Rightarrow \quad \rho' \cdot g \cdot V' = \rho \cdot g \cdot V \qquad (6)$$

$$\frac{V'}{V} = \frac{\rho}{\rho'} \equiv \kappa \qquad (7)$$

קיבלנו, שהיחס בין נפח הגוף, השקוע בתוך הנוזל, לכלל הנפח של הגוף שווה ליחס בין הצפיפויות של הנוזל לבין הגוף. יחס זה מגדיר מקדם κ של שקיעת הגוף. כאשר מדובר בתיבה, בה שווים שטחי הבסיס, ניתן לחליף את היחס בין הנפחים ביחס בין עומק השקיעה h לגובה של הגוף H:

$$\kappa = \frac{h}{H} = \frac{\rho}{\rho'} \qquad (8)$$



כך למשל, אם ידוע, שעבור קרח ומים היחס בין הצפיפויות שלהם הוא $\frac{5}{6}$, ניתן לטעון שמעל לפני המים תצוף שישית מגובהה של קוביית קרח הצפה. כך קורה בגושי הקרח הגדולים, בקרחונים,השטים באוקיאנוסים באזורי הקטבים בצפון ובדרום.

העובדה שאין רואים את רוב הגוף של הקרח, מגדילה את סכנת ההתנגשות. התנגשות כזאת, ביחס מסות לטובת הקרחון (מצב רגיל), עלולה לגרום לאסון, כפי שקרה ב 1912 באסון האונייה הענקית "טיטאניק", אשר התנגשה בקרחון באוקיאנוס האטלנטי, וטבעה, למרות שנחשבה כ-"לא ניתנת לטביעה" בקרב מהנדסי האוניות.



נסכם:



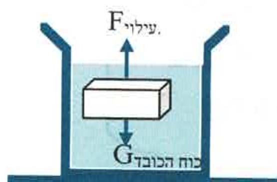
כאשר גוף צף על פני הנוזל, החלק שמתחת למפלס דוחה כמות הנוזל, השווה במשקלה למשקל המנוחה של הגוף.

היחס בין הנפח, השקוע בתוך הנוזל, ובין הנפח הכללי של הגוף, הוא היחס בין הצפיפות של הגוף לבין הצפיפות של הנוזל.

כאמור, כאשר מדובר בגוש חומר, מצב הציפה קיים, כאשר צפיפות חומר הגוף קטנה יותר מצפיפות הנוזל: $\rho < \rho'$.

ג. רחיפה

טיפלנו במקרים בהם צפיפות הנוזל **קטנה** מצפיפות הגוף (מצב שקיעה) ואחרים בהם צפיפות הנוזל **גדולה** מצפיפות הגוף (מצב ציפה). נתבונן במקרה שנותר: כאשר צפיפות הנוזל וצפיפות הגוף **שוות**.



קל להיווכח, שבמקרה כזה כוח העילוי, הפועל על הגוף, שווה בדיוק לכוח הכובד הפועל עליו:

$$F_{\text{עילוי}} = F_{\text{כוח הכובד}}$$

$$F_A = G = W$$

$$\rho'\cdot g\cdot V=\rho\cdot g\cdot V$$

$$\rho=\rho'$$

גוף בעל צפיפות זו נשאר "אדיש" למיקומו בתוך הנוזל, או **מרחף**. למעשה, קשה לדמיין מקרה כזה, משום שאין גוף מחומר אחיד שצפיפותו זהה לזו של המים. לכאורה נראה מצב זה חסר משמעות מעשית, אך במציאות דווקא למקרה זה חשיבות גבוהה מאוד.

נזכיר שבטיפול שלנו התייחסנו לגושי חומר אחיד, ומכאן הסקנו על שוויון הצפיפויות מתוך שוויון כוחות העילוי והמשקל. אותו שוויון ניתן להשיג גם במקרה של התפלגות חומר לא אחידה בתוך הגוף. ההתפלגות היא לא אחידה, אך היא כזאת, שאם נחשב את צפיפות הגוף על ידי חלוקת המסה הכוללת בנפח הכולל של הגוף, עדיין נקבל צפיפות זהה לזו של הנוזל בו שקוע הגוף:

$$\overline{d}=\frac{W}{V}=d' \qquad (10)$$

או:

$$\overline{\rho}\cdot g=\frac{m\cdot g}{V}=\rho'\cdot g$$

$$\overline{\rho}=\frac{m}{V}=\rho'$$

במקרה זה של גוף שאיננו אחיד בחומר, ממנו הוא עשוי, מדובר בצפיפות ממוצעת, אותה מסמנים ב-$\overline{\rho}$. כאמור, כאשר $\overline{\rho}$ ו-ρ' הם שווים, ונוצר מצב רחיפה של הגוף בתוך הנוזל.

בעצם כאשר אנו מדברים על מצב הגוף השקוע בתוך נוזל, צריך להתעניין בצפיפות הממוצעת שלו ביחס לצפיפות הנוזל, בו הוא שקוע

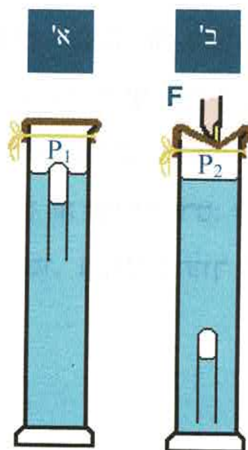




ריחוף במים הופך למקרה החשוב במקרה של צוללת, כלי שייט תת- ימי (תרשים). בתוך הצוללת ישנן משאבות, שיכולות למלא את המיכלים במים ולרוקן אותם. בהתאם, משתנה הצפיפות הממוצעת של הצוללת כולה, ומשתווה לצפיפות המים במקום מסוים. כאשר הושג תנאי זה, הצוללת מרחפת בתוך המים ויכולה לנוע כמו ספינה רגילה (בזכות המנוע) – אך מתחת לפני המים. ברור, שיש השלכות רבות לעובדה, שהצוללת היא כלי שיט סגור, שאין קשר עם האטמוספרה. ההשלכות הן בתחום הטכנולוגיה: יש לדאוג לאוויר לנשימה, למנוע ללא צריכת אוויר (חשמלי למשל) וכו', אך כל אלה לאחר שמתקיים התנאי של רחיפת הגופים בתוך הנוזל.

נדגים את עקרון הפעולה של הצוללת על ידי מתקן (צעצוע) המכונה הצוללן של דקארט (הצוללן הקרטזי). בהסבר נוותר על הצעצוע (מימין), ונדגים את עקרון הפעולה של המתקן באופן הפשוט ביותר.





דמיין מבחנה הפוכה, הנמצאת בתוך הנוזל (תרשים א'). בתוך המבחנה כלוא אוויר בכמות מסוימת. ניתן לדאוג לכך, שסכום כוחות העילוי של האוויר הכלוא ושל המבחנה יהיה שווה למשקל המבחנה. במצב זה המבחנה תרחף בתוך הנוזל. עתה נחשוב, שהנוזל נמצא בתוך משורה (או צנצנת), שסוגרים את פתחה באמצעות כרום

(ממבראנה), העשוי מחומר גמיש, שאינו חדיר לאוויר. כרום זה מתוח וסוגר את המשורה (תרשים א').

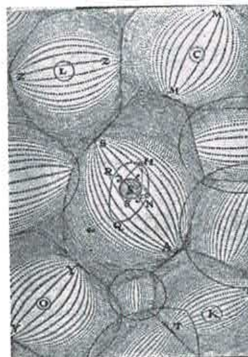
עתה נלחץ על פני הכרום באצבע, ונפעיל כוח F כלפי מטה (תרשים ב'). בעקבות כך יתעקם הקרום, וידחס את האוויר שמעל הנוזל שבצנצנת. הלחץ מעל הנוזל יעלה. בהתאם לחוק פסקל, תוספת הלחץ (השינוי מלחץ p_1 ללחץ p_2 בתרשים) תועבר לכל מקום בתוך המים שבמשורה. בין היתר יילחץ גם האוויר, הכלוא בתוך המבחנה, והוא יידחס. ירידת נפח האוויר בתוך המשורה תגרום לירידת כוח העילוי (האוויר יתפוס פחות נפח). ולבסוף, ירידת גודלו של כוח העילוי תגרום לכך, שהאיזון בין כוח הכובד לכוח העילוי על המבחנה כולה (כולל המילוי שבה: האוויר והמים) יופר, והמבחנה תשקע.

כל המתרחש בהדגמה זו דומה בעיקרון, למה שמתרחש בצוללת, כאשר היא ממלאת את המיכלים שלה במים, ויורדת לעמקים.


רנה דקארט
1650 - 1596

נשאר רק להסביר, מדוע הצוללן קיבל את השם "קרטזי". הסיבה לכך היא חשובה, ולכן נציג אותה.

בהדגמה מתקיימת שרשרת של מעברי לחץ: אנו לוחצים על הכרום, הכרום – על האוויר, האוויר – על הנוזל, והנוזל – שוב על האוויר שבמבחנה. דקארט, מדען צרפתי דגול בן המאה- 17, דמיין לעצמו את הארגון בעולם כשרשרת של לחצים. דקארט שלל את קיום הריק בטבע, והיה משוכנע, שכל המרחב מלא בחומר מסוים. בהדגמה של הצוללן נוצרת אשליה של הוכחת טיעון זה של דקארט: הלחץ מועבר דרך התווך, אותו איננו רואים, אך יש ביטוי מוחשי לקיומו. בהדגמה תווך זה הוא האוויר.



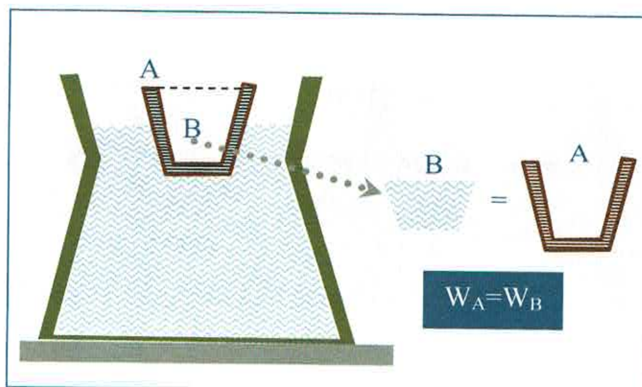
ולבסוף נציין גם את הגורם החשוב לרחיפה בתוך הנוזל: על הגוף המרחף להימנע ממגע רחב עם הקרקעית. במקרה כזה למשל, כשהצוללת, מסיבה זו או אחרת שוכנת על קרקע הים (תרשים), ובמיוחד כשהיא חולית, מופרים התנאים להיווצרות כוח עילוי. סכום הכוחות ההידרוסטאטיים ילחץ בכיוון מטה ויצמיד את גוף הצוללת לקרקע בכוח אדיר. ברור, שבמצב כזה הצוללת לא תוכל לעלות יותר אל פני הים ללא עזרה חיצונית. לא יעזור גם אם נרוקן את כל המיכלים שבתוכה. הגשת עזרה חיצונית בעומק רב מהווה בעיה טכנולוגית קשה ביותר, שניתנת לפתרון במקרים נדירים בלבד.



כלי שייט

כאמור, התנאי, שעל צפיפות החומר להיות מעל או מתחת לצפיפות הנוזל על, מנת לקבוע אם הגוף ישקע או יצוף על פני הנוזל, הוא תנאי פשוט למדי. תנאי זה תקף רק לגבי גופים המהווים גוף אחד, ללא חללים או התעקמויות משמעותיות. כך למשל אם ניקח קופסה עשויה ממתכת (A בתרשים), ונניח אותה על פני המים, נוכל לראות שהיא לא טובעת, וכזה הוא בעצם המצב בכל כלי שייט מודרני, שבדרך כלל עשוי מחומרים, "הכבדים מן המים". ברור, שלא מדובר בטעות שעשינו אלא במצב חדש, אותו נציג.

כפי שכבר מצאנו במקרה של רחיפת גוף בנוזל, כאשר הגוף אינו אחיד, יש להתייחס לצפיפות הממוצעת שלו. גם במקרה הציפה המצב הוא דומה.



בהדגמה שהצגנו, למרות שהקופסה A עשויה ממתכת,

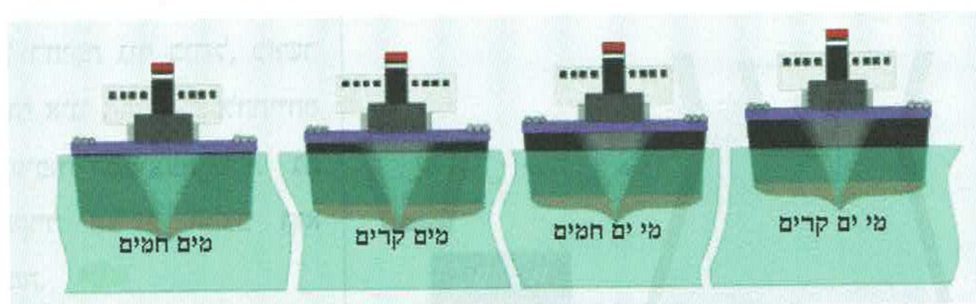
הציפה היא אפשרית, כי כוח העילוי נקבע על ידי המים, שנדחו (בנפח B) לעומת כובד הגוף, שרובו הוא הקופסה עצמה A. הציפה מתאפשרת, כאשר שני הכוחות, כוח העילוי וכוח הכובד שווים, כלומר, משקל המים הנדחים שווה למשקל הכלי (משקל האוויר בתוך הכלי הרי זניח): $W_A=W_B$. מצב זה אפשרי, כי הנפח B גדול בהרבה מנפח המתכת של הגוף (או, במילים אחרות, רוב הנפח של הקופסה הוא אוויר). זהו עקרון הציפה של כלי שיט.

עיקרון הציפה של כלי השיט:

המים, שנדחו על ידי כלי השיט, שוקלים כמו הספינה כולה.



על סמך הנאמר, ניתן להסביר שקיעה משתנה של אותה אוניה בתנאים שונים של המים. היות שטמפרטורת המים וגם נוכחות חומרים שונים בתוכם(כמו מלחים ומינרלים) משנים את צפיפותם של המים, הדבר משנה את נפח המים, השווה למשקל האוניה, וכך קורה שמידת השקיעה של כלי השייט תלויה בסביבה בה שטה הספינה.

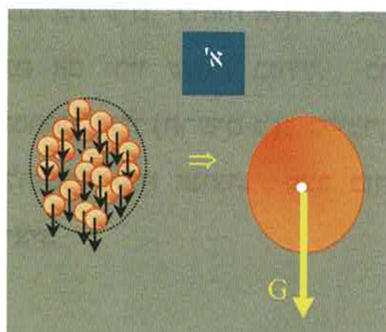




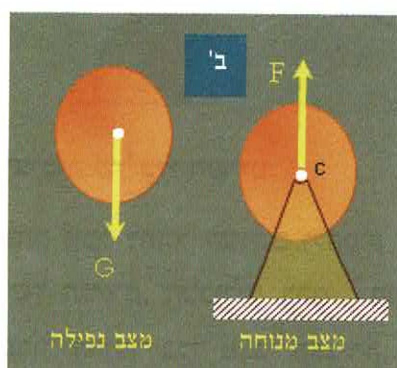
בכלי שייט מעשיים, מלבד התנאי שהכלי יצוף, ישנו צורך ביציבות הכלי. מהו הטעם, שהאוניה אומנם תצוף על פני המים, אבל תתהפך בכל סטייה קלה ממצבה האנכי לפני המים?

כדי לענות על השאלה, מהם התנאים ליציבותו של כלי השייט, יש להיעזר במושג מרכז הכובד של גוף כלשהו. נזכיר אותו.

מרכז הכובד



כפי שלמדנו, כל גרגיר של חומר או כל טיפת נוזל קטנה נמשכים כלפי כדור הארץ בכוח הכובד. ניתן לסכם כוחות אלה, הפועלים על מרכיבי הגוף, לכוח אחד, אשר אותו אנו מכנים "כוח הכובד הפועל על הגוף – G" (תרשים א'). כוח זה גורם לנפילת הגוף או למשקלו, כאשר הוא מונח על בסיס תומך כלשהו. כידוע, ניתן בפשטות למדוד את המשקל על ידי שקילה במאזנים.

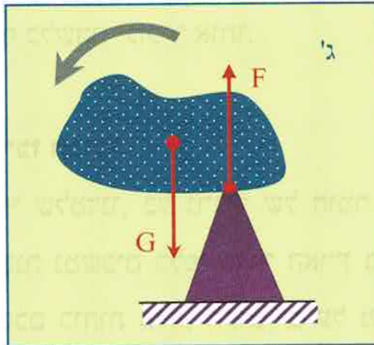


אבל נשאלת השאלה להיכן נצמיד את "כוח הכובד הפועל על הגוף"? אין זו שאלה פשוטה, הרי "כוח" הוא המצאה שלנו, של האנשים, אותה הצענו על מנת לאפיין את המשיכה, הקיימת בין הגופים במציאות. הגיוני להצמיד את הכוח למקום כזה, שאם נתמוך בו בגוף בכוח, ששווה בגודלו ל-G ומכוון כלפי מעלה, נוכל לנטרל את הכוח G, והגוף, כתוצאה מכך, יישאר נייח במקומו (תרשים ב').

בדרך זו מגדירים באופן **מעשי** את מרכז הכובד של הגוף:



מרכז הכובד של הגוף הוא נקודה כזאת, שאם נתמוך בה את הגוף בכוח, השווה בגודלו לכוח הכובד, הפועל על הגוף, הגוף יישאר במנוחה.

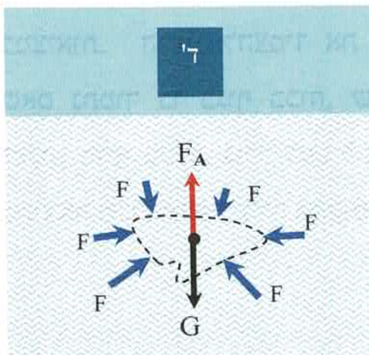


ומה יקרה אם נתמוך בגוף שלא במרכז הכובד שלו? במקרה כזה נוצר מצב, שבו מופעלים על הגוף שני כוחות: כוח הכובד G והכוח, שהפעלנו F, כמו בתרשים. כוחות אלה לא יוכלו לאזן זה את זה, גם אם יהיו שווים בגודל. כתוצאה מכך הגוף יסתובב כולו (תרשים ג'). כלומר, מצב זה אינו יכול להישמר ללא תנועה. מצב כזה מכונה **מצב לא יציב**.



גופים מוצקים יכולים להסתובב, אך מה קורה עם הנוזלים? האם שם ניתן לדבר על יציבות?

יציבות של כלי השייט



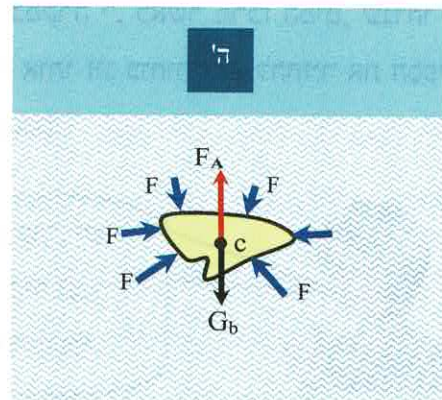
עתה נוכל לחזור לנוזלים ולהסיק על היציבות שלהם ושל הגופים, הטבולים בהם. חוקי התנועה תקפים עבור החומר בכל מצבי הצבירה. הם חלים גם על נוזלים, אך עקב היכולת של כל טיפת נוזל לנוע יחסית לסביבה יש לטפל בנוזלים בהתאם. נחזור למשל, לניסוי המחשבתי, שעסקנו בו בדיון על קיומו של כוח

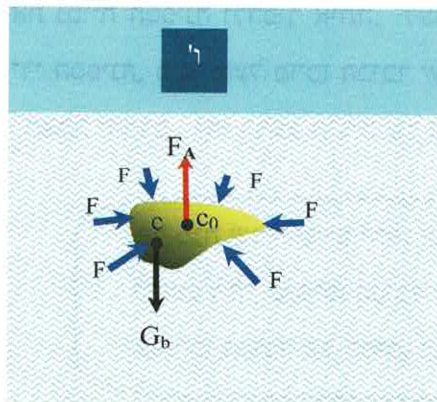
העילוי (תרשים ד'). הסקנו, שנייחות של כל נפח בנוזל מעידה על כך, שפועל עליו זוג כוחות, כוח הכובד וכוח העילוי, המאזנים זה את זה. עתה נשים לב, שמאותו מצב נובע גם, שעל סמך חוקי התנועה ניתן לטעון לא רק, שגודל הכוח העילוי שווה לכוח הכבידה, אלא גם, שיש להצמיד את כוח ארכימדס, הפועל על נפח זה של הנוזל, בדיוק לנקודת מרכז הכובד של אותו נפח נוזל. קיבלנו תוצאה חשובה: ניסוח כולל יותר של חוק ארכימדס:

כוח העילוי, הפועל על כל כמות נוזל, שווה למשקל אותה כמות נוזל, ויש להצמיד את כוח העילוי למרכז הכובד של כמות זו של הנוזל!



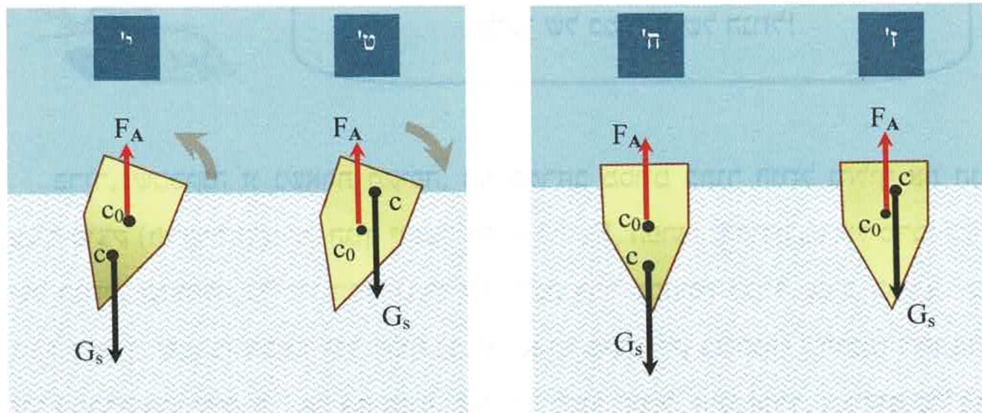
ברור, שמסקנה זו נשארת תקיפה, אם במרחב מסוים בתוך הנוזל נחליף את הנוזל בגוף מוצק (תרשים ה'): על הגוף יופעל כוח עילוי F_A, הפועל בנקודה c_0 של מרכז הכובד של הנוזל, שהוחלף על ידי הגוף (הרי שהשתנה דבר מבחינת הנוזל סביב הגוף). עתה נוכל לטעון, שמרכז הכובד של הגוף נמצא באותו מקום רק כשהגוף שהוכנס הוא אחיד. זהו המקרה בתרשים ה'. אך אם הגוף, שהוכנס לתוך הנוזל, אינו אחיד, המיקום של מרכז הכובד שלו לא יישאר באותה נקודה. הגענו למצב, בו יש להציג את כוח העילוי ואת כוח הכובד ככוחות, הפועלים מתוך נקודות שונות (תרשים ו'): c_0 – מקום ההצמדה של כוח העילוי F_A ו-, c – מקום ההצמדה של כוח הכובד G_b.





ראינו גם, שבמקרה של גוף, שאינו אחיד (כאלה הם כל כלי השיט), יש להשוות את **הצפיפות הממוצעת** של הגוף עם הצפיפות של הנוזל, כדי לקבוע, האם הגוף ישקע או יצוף. עתה נוכל לענות גם על שאלת יציבות כלי השיט.

לאור הנאמר לגבי שני מקומות צימוד הכוחות של העילוי והכובד (תרשים ו'), ניתן לדמיין רק שני מצבים אפשריים, אותם נציג בתרשימים ז' ו- ח'. ההבדל בין המקרים הוא, שבמקרה ז' מרכז הכובד של הספינה c מצוי מעל מרכז הכובד של המים, שהוחלפו על ידי הספינה – c_0, בתרשים ח' המצב הוא הפוך (המקרה בו שני המרכזים מתלכדים אינו מעניין, כי הוא תואם למקרה של גוף אחיד, וזה נדיר במציאות).



נחשוב מה יקרה בספינות בשני המקרים, כאשר הספינות מקבלות נטייה לצד (תרשימים ט' ו- י').

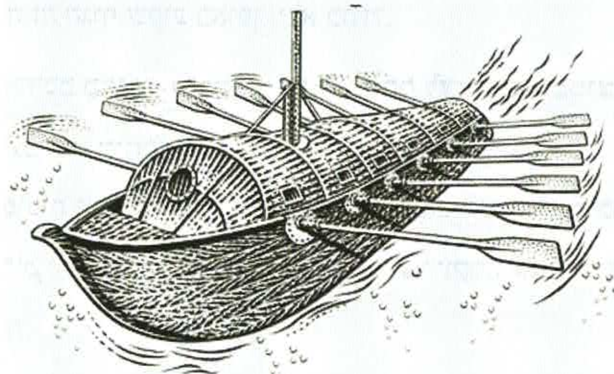
במקרה שבתרשים ט', עקב הנטייה של הספינה נוצר זוג כוחות, שמנסה להגדיל יותר את נטיית הספינה ולהפוך אותה. לעומת זאת, במקרה י', כאשר מרכז המים, שנדחו על ידי הספינה, מצוי מעל מרכז הכובד שלה, נטיית אותו זוג כוחות היא להחזיר את הספינה למצבה הקודם. זהו המצב היציב של הספינה. נסכם:



על מנת שכלי שייט יהיה יציב בפני היפוך, יש לדאוג לכך, שמרכז הכובד של הכלי יהיה נמוך ממרכז הכובד של המים, שנדחו על ידי הכלי.

בפועל, על מנת להגביר יציבות כלי שייט, דואגים לשים משקולת כבדה בתחתית הספינה, ולהעמיס משא כבד עמוק בבטן האוניה. כל זה מוריד את מרכז הכובד של הספינה, ומגדיל את יציבותה.

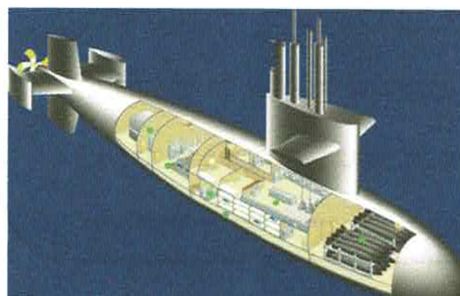
נשים לב גם לפרט נוסף אך לא פחות חשוב ליציבותה של האוניה. על מרכז הכובד של האוניה להיות באמצע, בין צידי השייט (לא לסטות ימינה או שמאלה, קדימה או אחורה). זאת משום שבנוסף ליציבות, על האוניה להתייצב ישר בניצב למפלס המים וללא נטייה לאחד הצדדים. לכך דואגים המהנדסים בתכנון הספינה, והימאים – בהעמסתה במשא.



איור של הצוללת הראשונה שנבנתה בשנת 1620 על ידי הולנדי בשם קורנליס דרבל. הצוללת הייתה למעשה סירת-משוטים עשויה מעץ, שצופתה בעור אטום למים. הצליחה לרדת לעומק ארבעה מטר ולשהות שם מספר שעות.



הצוללת הגרעינית הרוסית delta III.



הצוללת האמריקנית Blueback הייתה צוללת התקיפה האחרונה של ארצות הברית שלא הונעה באמצעות כור גרעיני.

מה למדנו בפרק זה?

1. גוף המורכב מחומר, אחיד המצוי בתוך נוזל, יכול להיות באחד משלושת המצבים:
   א. **שקיעה,** כאשר צפיפות החומר גדולה מצפיפות הנוזל ($\rho > \rho'$).
   ב. **ציפה,** כאשר צפיפות החומר קטנה מצפיפות של הנוזל ($\rho' < \rho$).
   במקרה זה הגוף שקוע באופן חלקי בנוזל כך, שמשקל המים שהוא דוחה, שווה למשקל הגוף.
   ג. **רחיפה,** כאשר צפיפות החומר שווה לצפיפות הנוזל ($\rho' = \rho$).
   במקרה זה הגוף שקוע באופן מלא בנוזל.

2. כאשר גוף מורכב מחומר לא אחיד, יש להתייחס **לצפיפות הממוצעת** שלו, $\bar{\rho}$,
   בהשוואה לצפיפות הנוזל, ρ'.
   בהתאם לצפיפות הממוצעת , מתקבלים המצבים הבאים: שקיעה כאשר $\bar{\rho} > \rho'$,
   ציפה כאשר $\bar{\rho} < \rho'$ או רחיפה כאשר $\bar{\rho} = \rho'$. על עקרון זה בנויים כלי השיט,
   כולל צוללות.

3. **מרכז הכובד של גוף** הוא המקום, שאם תומכים בו את הגוף בכוח, שגודלו שווה למשקל הגוף, גורמים לכך, שהגוף יישאר במצב מנוחה.

4. את כוח העילוי (או כוח ארכימדס) הפועל על הגוף יש לדמיין, כאילו הוא פועל במקום, בו מצוי מרכז הכובד של הנוזל, שהוחלף על ידי הגוף, השקוע בתוך הנוזל.

5. במקרה שמרכז הכובד של הגוף מצוי נמוך ממרכז הכובד של הנוזל,
   שנדחה על ידי הגוף, הגוף השקוע יהיה יציב לנטיות לצדדים.
   במקרה ההפוך הגוף, השקוע בנוזל, לא יהיה יציב, והגוף יתהפך בכל נטייה קלה הצידה. על עקרון זה של יציבות בנויים כלי השיט.





שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1) משקלם הסגולי של מי-נהר קטן מזה של מים באוקיינוס, לכן:

א. כאשר אוניה תעבור מן האוקיינוס לנהר, היא תשקע יותר.

ב. כאשר אוניה תעבור מן האוקיינוס לנהר, היא תשקע פחות.

ג. לא צריך להיות שינוי במצבה של האוניה.

ד. אין לנו די נתונים כדי לדעת, כיצד תתנהג האוניה.

2) עץ צף על המים, ואבן שוקעת במים, כי:

א. על העץ פועל כוח עילוי גדול יותר מאשר על האבן.

ב. על האבן פועל כוח עילוי גדול יותר מאשר על העץ.

ג. משקלה של האבן גדול מזה של העץ.

ד. משקלו הסגולי של העץ קטן מזה של האבן.

3) לתוך דלי, המלא מים עד קצהו, הכניסו בול עץ שמשקלו במנוחה 1N, כתוצאה מכך:

א. לא יחול שינוי במשקלו של הדלי.

ב. משקל הדלי יקטן.

ג. משקל הדלי יגדל.

ד. בול העץ ישקע.

4) גוש קרח צף בכלי, המכיל מים. כאשר הקרח יימס:



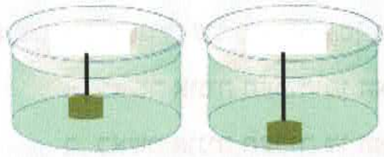
א. פני המים יעלו בכלי.

ב. פני המים ירדו בכלי.

ג. פני המים יישארו במקומם.

ד. לא ניתן לדעת, מה יהיה גובה פני המים בכלי.

5) בשני כלים זהים, שמכילים מים, צפים שני בולי שעם זהים הקשורים לשתי משקולות זהות, כמתואר בשרטוט. המשקולת שבכלי הימני צמודה לקרקעית. האם נכון ש:



א. משקלו של כלי א' גדול יותר ?

ב. משקלו של כלי ב' גדול יותר ?

ג. משקלם של שני הכלים זהה ?

ד. לא ניתן לדעת, איזה משני הכלים שוקל יותר ?

6) אם ניקח בקבוק זכוכית מלא במים, ונכניס אותו לתוך מיכל מים:

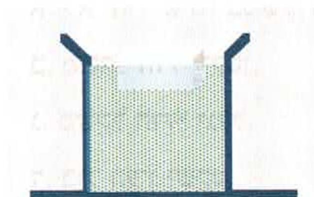
א. הוא ישקע בתוך המיכל.

ב. הוא יצוף בתוך המיכל.

ג. הוא ירחף בתוך המיכל.

ד. התשובה תלויה במימדי הבקבוק.

7) גוש קרח, שצפיפותו, $\rho' = 900\frac{kg}{m^3}$, צף בכלי, המכיל גליצרין, שצפיפותו, $\rho' = 1260\frac{kg}{m^3}$. (תרשים). כאשר הקרח יימס:



א. רמת הנוזל בכלי תעלה.

ב. רמת הנוזל בכלי תרד.

ג. רמת הנוזל בכלי לא תשתנה.

ד. רמת הנוזל בכלי תעלה, אם נפח הגוש גדול, ותרד, אם נפחו קטן.

8) סיר בישול ריק, העשוי אלומיניום, צף בכלי, שמכיל מים. כאשר נשקיע את הסיר במים:

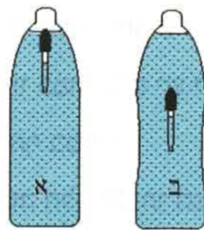
א. רמת המים בכלי תעלה.

ב. רמת המים בכלי תרד.

ג. רמת המים בכלי לא תשתנה.

ד. לא ייתכן, שסיר אלומיניום יצוף, כי צפיפותו גדולה מזו של המים.

10) מכניסים טפי לתוך בקבוק, המלא במים. דואגים לכך, שהטפי יצוף, ואז סוגרים את הבקבוק (מצב א'). לאחר מכן לוחצים על הבקבוק משני צידיו (מצב ב').



האם נכון ש:

א. הטפי ישקע ?

ב. מים ייכנסו לתוך הטפי ?

ג. לחץ הנוזל על קרקעית יגדל ?

ד. כל התשובות נכונות ?

דוגמה



קוביית קרח שצפיפותו $\rho = 900\frac{kg}{m^3}$ בולטת ב- 0.02m מעל מיץ, שצפיפותו $\rho' = 1200\frac{kg}{m^3}$. חשבו את עומק השקיעה של קוביית הקרח בתוך המיץ.

פתרון:

מאחר שנדרשנו לחשב, כמה ס"מ של הקובייה נמצאים בתוך המיץ, נסמן את עומק השקיעה של הקובייה ב- x. על סמך זאת נבטא את גובה הקרח כולו:

$$H = x + 0.02$$

נסמן את שטח הבסיס של קוביית הקרח ב-A.

נפח קוביית הקרח ניתן על ידי ביטוי:

$$V = A \cdot H = (x + 0.02) \cdot A$$

נפח החלק השקוע:

$$V' = H' \cdot x \cdot A$$

נציב ביטוים של נפח בתנאי הציפה: $V \cdot \rho \cdot g = V' \cdot \rho \cdot g$ ונקבל:

$$(x + 0.02) \cdot A \cdot 900 = x \cdot A \cdot 1200$$

$$(x + 0.02) \cdot 900 = x \cdot 1200$$

$$x = 0.06m$$

6 ס"מ מגובה הקובייה שקועים בתוך המיץ.

דוגמה

מסתו של בקבוק ריק היא 0. 2kg נפחו החיצוני של הבקבוק $V_1 = 0.0004\ m^3$, ונפחו הפנימי הוא $V_2 = 0.0003\ m^3$.



א. איזו כמות מים יש למלא, כדי שהבקבוק ירחף במים?

ב. איזה חלק מנפחו הפנימי של הבקבוק תופסים המים?

פתרון:

א. כדי שהבקבוק ירחף במים, צפיפותו(ביחד עם המים והאוויר שבתוכו) צריכה להיות שווה לזו של המים, כלומר: $1000\frac{kg}{m^3}$.

נפחו החיצוני של הבקבוק: $V_1 = 0.0004\ m^3$

נסמן את מסת המים, שיש להכניס לבקבוק ב-m_x. מאחר שמסת הבקבוק הריק היא $m_2 = 0.\ 2kg$, מסתו של בקבוק המים m יהיה:

$$m = m_x + m_2 = m_x + 0.2$$

נחשב את הצפיפות הממוצעת של הבקבוק עם המים:

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V} = \frac{m_x + 0.2}{0.0004}$$

על סמך תנאי הרחיפה $\rho = \rho'$ נקבל:

$$\frac{m_x + 0.2}{0.0004} = 1000$$

ומכאן:

$$m_x = 0.2kg$$

כדי שהבקבוק ירחף בתוך המים, יש למלא אותו ב- 0.2kg מים.

ב. אם מסת המים 0.2kg, הנפח שלהם הוא $0.0002\ m^3$. נתון, שנפח הבקבוק הוא $0.0003m^3$, ולכן יש למלא $\frac{0.0002}{0.0003} = \frac{2}{3}$ מהבקבוק.



שאלות חישוב

1) גוף צף על פני מים, כאשר $\frac{1}{3}$ מנפחו בולט מעל למים. מהי צפיפות הגוף?

2) הצפיפות של עץ היא $\rho = 700\ \frac{kg}{m^3}$, ושל המים $\rho' = 1000\frac{kg}{m^3}$. אם העץ צף על פני המים, איזה חלק מנפחו יבלוט מעל המים?

3) כאשר לוקחים גוף, שמסתו 0.07kg, הוא צף על פני מים. אם מצמידים אליו משקולת של 0.02kg, הגוף מרחף במים.

א. מצאו את נפח הגוף.

ב. מצאו את צפיפות הגוף.

4) קרחון, שגובהו 0.5m, וצפיפותו $\rho = 900\ \frac{kg}{m^3}$, צף על פני המים. מצאו עד איזה עומק ישקע הקרחון (הניחו שצורתו היא קובייה).

5) משקלו של בקבוק הוא 1.5N, נפחו החיצוני $V = 0.0003\ m^3$ ונפחו הפנימי $V = 0.0002\ m^3$. ממלאים $\frac{3}{4}$ מהבקבוק במים, ומניחים אותו על פני המים. האם הבקבוק ישקע, ירחף או יצוף?

6) לתוך נוזל, שצפיפותו היא $\rho' = 1100\frac{kg}{m^3}$ מכניסים קוביית קרח, שצפיפותה $\rho = 900\frac{kg}{m^3}$. איזה אחוז מנפח הקובייה יהיה שקוע בתוך הנוזל?

7) בתוך כוס, המכילה מיץ, שצפיפותו היא $\rho'=1100\frac{kg}{m^3}$, צפה קוביית קרח, שצפיפותה $\rho=900\frac{kg}{m^3}$. הקובייה שקועה 0.05m בתוך המיץ. חשבו את גובה הקובייה הבולט מעל מפלס המיץ.

8) בול צף על פני נפט, שצפיפותו $\rho' = 800 \frac{kg}{m^3}$. מהי צפיפות הבול, אם ידוע, ש- 25% מנפחו של הבול בולטים מעל מפלס הנפט?

9) לוקחים 0.2N ברזל, שצפיפותו $\rho_1 = 7200 \frac{kg}{m^3}$, וקושרים לגוש של שעם, שצפיפותו $\rho = 240 \frac{kg}{m^3}$. כמה שעם יש לקחת, כדי ששני הגופים, הקשורים יחד, ירחפו בתוך נפט, שצפיפותו $\rho' = 800 \frac{kg}{m^3}$?



10) שני אנשים, שמסת כל אחד מהם היא 60kg, יושבים בתוך סירה, שמסתה משקל-המנוחה שלה היא 50kg. שטח קרקעית הסירה $1.8m^2$. בכמה שוקעת הסירה בנהר?

11) בלז פסקל (המאה ה-17) כתב, שראה בול עץ על קרקעיתו של כלי, המלא בכספית, והבול לא צף על פני הכספית, למרות שצפיפותו של העץ קטנה בהרבה מזו של הכספית. הסבירו מדוע לא צף הבול?

12) איך ייראה מצב יציב של אוניה, כאשר מטענה מרוכז בצידה האחד? הראו את מיקומו של מרכז הכובד של האוניה ואת מיקומו של מרכז הכובד של המים, שנדחו על יד האוניה.

תשובות

1) $666.67 kg/m^3$ **2)** 30%

3) א. $0.00009\ m^3$ ב. $777.77\ kg/m^3$ **4)** 0.45m

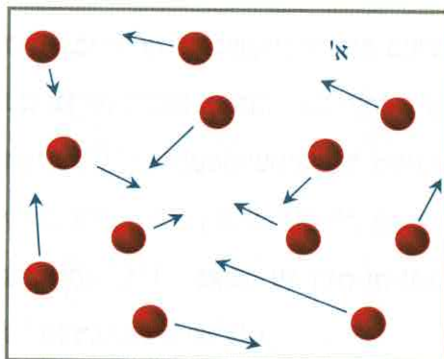
5) הבקבוק ירחף $\rho = 1000\ kg/m^3$ **6)** 81.8%

7) 0.0111m **8)** $\rho = 600\ kg/m^3$ **9)** 0.076N **10)** 0.0944m

תכונות הגזים

נזכיר תכונות חשובות המאפיינות את החומרים במצב צבירה של גז.

אחד מן האפיונים המרכזיים של גזים הוא **לחץ**. הגדרנו אותו בהקשר ל**מוצקים ונוזלים**. עתה נשתמש בו גם בהקשר לגזים. הואיל וגז הוא מצב צבירה של החומר, והחומר מורכב מחלקיקים, עלינו להבין, כיצד נוצר לחץ מתוך התנהגות החלקיקים, המרכיבים את הגז.



בגזים (תרשים א'), צפיפות החלקיקים קטנה בהרבה מזו של הנוזלים והמוצקים. הכוחות בין החלקיקים הם חלשים מאוד. ניתן לחשוב שרוב הזמן כל חלקיק בגז אינו מודע לקיומם של יתר החלקיקים. הכול משתנה בין רגע כאשר מתנגשים החלקיקים. ברגע של התנגשות, הכוחות ביניהם גדולים מאוד, וכתוצאה החלקיקים משנים באופן חד את תנועתם. בין ההתנגשויות החלקיקים נעים בהתמדה, כאילו הם חלקיקים חופשיים.

נסכם את הנאמר על הגזים מבחינת המאפיינים העיקריים של טיבם.

צורה חיצונית	גזים מקבלים את צורת הכלי, וממלאים את כולו
נפח	אינו נשמר
צפיפות החלקיקים	נמוכה וקלה לשינוי
חופש התנועה של החלקיקים	חלקיקי הגזים נעים לכל הכיוונים. תנועתם היא אקראית, ושינויי תנועתם חלים בזמן ההתנגשויות ביניהם ובין חלקיקי דפנות הכלי, בו הם מצויים.

נפריד בין שני סוגי תיאור מצב החומר, אותם נדגים בגזים: תיאור **מאקרו** (תיאור בגדול) ותיאור **מיקרו** (תיאור בקטן). בתיאור מאקרו משתמשים בגדלים, שהם פרי

מדידה ישירה של עצם, שהוא נושא המחקר, באמצעות מכשירים שונים כמו מאזניים, סרגל, שעון וכו'.

כך נמדוד **אורך** כל דבר באמצעות הסרגל. ניתן להרחיב ולהגיד, שגם **נפח** ניתן למדוד באמצעות סרגל: מודדים אורך, רוחב ועומק של הכלי, בו מצוי הגז (במקרה של צורת תיבה של הכלי, כמובן), ומחשבים את נפח הגז. במקרים של כלי בעל צורה מורכבת יותר משתמשים בשיטות אחרות (כמו זו, שבה השתמש ארכימדס), אך כולם בעצם מבוססים על שימוש בסרגל.

מדידה של **טמפרטורה** מתבצעת באמצעות **מד חום** (טרמומטר). הסוג הנפוץ של מד חום מבוסס על התפשטות הגופים בחימום. כך יעלה מפלס הכספית, הכלואה בתוך צינור, עם עליית הטמפרטורה. מכיילים צינור כזה לפי רמת המפלס בטמפרטורה של קיפאון המים (0°C) ובטמפרטורה של רתיחת המים (100°C), ומחלקים את הסקלה ליחידות שוות אורך. הסקלה המתקבלת מכונה סקלה של צלסיוס ויחידה אחת בה היא מעלה של צלסיוס: 1°C. כאשר מד חום זה נמצא בכלי במגע ישיר עם הגז, רמת הכספית בו תעיד על הטמפרטורה של הגז.

את מדידת **הלחץ** ניתן לעשות גם במספר דרכים. למשל, מרוקנים קופסה עשויה שכבה דקה של מתכת אלסטית, ומודדים את עיוות פני הקופסה, המצויה בתוך הגז. מידת העיוות מעידה על גודל הלחץ של הגז על הקופסה (זהו, כזכור, ברומטר אנרואידי).

כל הגדלים שהזכרנו: הנפח, הטמפרטורה והלחץ הם אפיוני **מאקרו** של כמות מסוימת של גז. את כמות הגז (מסתו) ניתן למדות בעזרת השקילה (את תוצאת השקילה יש לתקן בהתחשבות, בכוח העילוי המופעל על הכלי).



את מצבו של גז מאפיינים על ידי מדדי **המאקרו** הבאים:
נפח הגז – V (ביחידות של מטר בשלישית)
טמפרטורת הגז – t (ביחידות של °C)
לחץ P (ביחידות כוח ליחידות שטח).
כמות, או מסה, של הגז – m (מודדים בקילוגרמים)

כאמור, מדדי המאקרו מאפיינים כמות מסוימת של גז ללא קשר לשאלות כגון: מאין נובעים מדדים אלה? מה קורה עם החלקיקים המרכיבים את הגז? ניתן לחקור את תכונות הגז בתיאור מאקרו של מצב הגז ולקבוע את היחסים בין הגדלים, אותם הזכרנו, כלומר, את החוקיות הקיימת. למשל, מה יקרה, אם נכלא גז בתוך כלי סגור ונחמם אותו? מה יקרה, אם נפעיל על גז שבקופסה לחץ באמצעות בוכנה? על שאלות מסוג זה עונה תחום הפיזיקה המכונה תרמודינמיקה.



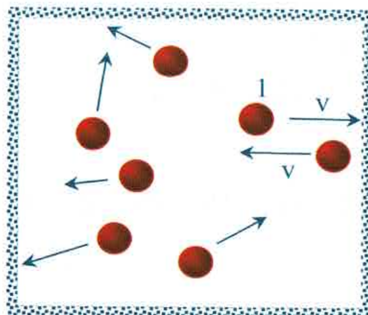
התרמודינמיקה מתארת את הכללים ואת החוקיות בהם קשורים ביניהם מדדי **המאקרו** בתיאור החומר: לחץ, נפח, טמפרטורה, מסה (m, V, P, t). זאת ללא קשר להרכב החומר ולהתנהגות החלקיקים, מהם בנוי החומר.



ברור, שהפיזיקאים שואלים שאלות מעבר למדדי המאקרו, כמו: מאין באה התכונה של טמפרטורה ? מה "עומד" מאחורי הלחץ של הגז? כלומר, מה קובע את הלחץ? מדוע החוקים הם כאלה ולא אחרים ? שאלות אלו הן מעבר לתחום התרמודינמיקה, ושייכות לתחום אחר – **פיזיקה סטטיסטית**.

במסגרת הפיזיקה הסטטיסטית בונים הפיזיקאים **מודלים**, מערכות מדומות, של כדורים למשל, שמייצגות חלקיקים קטנים, הנעים באופן אקראי לכל הכיוונים. מודל כזה מייצג את הגז, והוא טוב למחקר של כמה מתכונותיו. נדגים את השיטה של הפיזיקה הסטטיסטית.

כלי סגור המכיל גז



נדמיין קופסה מלאה בגז. נחשוב, שהגז הוא אוסף של חלקיקים קטנים, הנעים לכל עבר באופן אקראי ובאופן חופשי עד להתנגשות בחלקיק אחר או בקיר – זהו המודל שלנו (תרשים ב').

מכל החלקיקים נעקוב אחרי חלקיק 1, שנע ימינה לקראת דופן הכלי. החלקיק הוא בעל מסה m_1 ונע במהירות v. לאחר התנגשות, אותה נניח כאלסטית, מוחזר החלקיק במהירות

הפוכה: v–. זאת משום שהתנגשות עם חלקיקי הקיר, הקשורים זה בזה דומה להתנגשות עם חלקיק מאוד גדול ומסיבי. במקרה כזה החלקיק הפוגע מוחזר לאחור במהירות הפוכה. אם כך הדבר, חל אצלו שינוי תנע: מתנע התחלתי של: p_1=mv לתנע p_2=-mv. שינוי זה הוא בגודל:

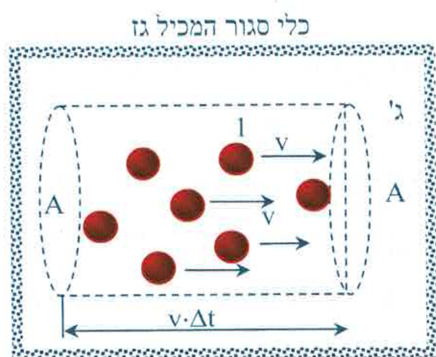
$$\Delta p = p_2 - p_1 = -m \cdot v - m \cdot v = -2m \cdot v$$

שינוי זה של התנע אצל חלקיק 1 מעיד על כך, שפעל עליו כוח F מצד הקיר. על סמך החוק השלישי של ניוטון נוכל להסיק, שאותו כוח פעל גם על הקיר בזמן ההתנגשות. על גודלו של כוח זה מעיד החוק השני של ניוטון:

$$\Delta p = F \cdot \Delta t$$

לכן, אנו יכולים לרשום:

$$-2m \cdot v = F \cdot \Delta t \qquad (1)$$



עתה נתחשב בקיומם של חלקיקים נוספים בתוך הגז. בפרק הזמן Δt לא רק חלקיק 1 יתקע בקיר אלא גם חלקיקים אחרים. אם נניח שכל חלקיקי הגז נעים ימינה באותה מהירות v (הנחה לא סבירה בהחלט!) נסיק, שבפרק הזמן Δt כל החלקיקים, המצויים בתוך גליל בעל אורך v·Δt ובסיס A, יתנגשו בקיר (תרשים ג'). בכל התנגשות כזו יפעיל על קיר כוח, שגודלו בהתאם לביטוי (1). לכן, תרומת כל החלקיקים שבתוך הגליל, שמספרם N, לכוח הפועל על הקיר תתבטא בכך, שנרשום במקום ביטוי (1):

$$-2m \cdot v \cdot N = F \cdot \Delta t \qquad (2)$$

עבור מספר N של חלקיקים בתוך גליל בעל נפח A נוכל לרשום:

$$N = V \cdot n \qquad (3)$$

כאן n היא צפיפות החלקיקים (מספר החלקיקים ביחידת הנפח). נפרט את גודל הנפח של הגליל:

$$V = A \cdot v \cdot \Delta t \qquad (4)$$

אם נציב ביטויים (4) ו-(3) לתוך (2), נקבל עבור הכוח, המופעל על ידי החלקיקים על קיר בעל שטח A במשך זמן Δt:

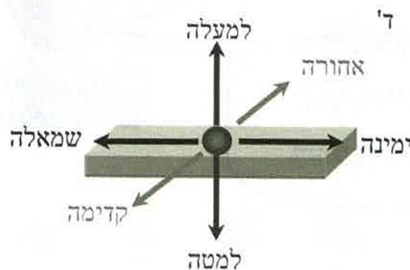
$$2m\cdot v\cdot A\cdot v\cdot \Delta t\cdot n=F\cdot \Delta t \qquad (5)$$

סימן המינוס נעלם, כי אנו מתכוונים עתה לכוח, המופעל על הקיר, של הכלי ולא על החלקיקים (כוח זה לפי החוק השלישי של ניוטון הפוך בכיוון ושווה בגודל, לכוח המופעל על החלקיקים). זוהי תוצאה חשובה מאוד. נוודא זאת אם נזכיר את הגדרת הלחץ: $P=\frac{F}{A}$. אז, ביטוי (5) מקבל את הצורה הבאה:

$$2m\cdot v^2\cdot n=P \qquad (6)$$

קיבלנו, שאת הלחץ P שמפעיל גז של חלקיקים על הקיר, במסגרת המודל שלנו, ניתן לבטא על ידי ביטוי מתמטי מדויק. אך אל נרבה בשמחה מעבר למותר! נזכור את ההנחות שעשינו בדרך.

א' הנחנו, שכל החלקיקים נעים אופקית ימינה לתוך הקיר. זה בוודאי אינו נכון, את התיקון ניתן לבצע על ידי הקטנת מספר ההתנגשויות לפחות פי- 6, מדוע? אם נניח שכל הכיוונים הם סבירים באותה המידה בתנועת החלקיקים בגז, נצטרך להתחשב באפשרויות של תנועה: ימינה-שמאלה, למעלה-למטה, קדימה-אחורה. אילו הם שש האפשרויות (תרשים ד'). בהתאם יש להוריד את כמות ההתנגשויות בביטוי (6).



ב' הנחנו גם, שכל החלקיקים נעים באותה מהירות, v. גם זה בוודאי אינו נכון: המשך המחקר בפיזיקה הראה, שלחלקיקי הגז יש מגוון מהירויות גם בגודל. אך ניתן להתחשב בכך, אם במקום ריבוע של המהירות v^2, נשתמש בממוצע, שאותו נסמן $<v^2>$.

אם נחזור לביטוי (6) נקבל ביטוי מתוקן:

$$\boxed{\frac{1}{3}m\cdot <v^2>\cdot n=P} \qquad (7)$$

ביטוי זה מקשר את הגודל המיקרוסקופי של הלחץ P בתוך הגז עם הגדלים המיקרוסקופיים של הגז: מסה של חלקיקי גז m, צפיפותן n, וריבוע המהירות הממוצעת $< v^2 >$.



מקורו של **הלחץ** בתוך הגז הוא ההתנגשויות של חלקיקי הגז עם דפנות הכלי. לחץ הגז פרופורציוני לצפיפות החלקיקים, לממוצע של ריבוע מיהירויותיהם ולמסתם.



זהו הישג גדול לפיזיקה, כאשר היא מצליחה לקשר בין גדלי מאקרו, אותם מודדים במעבדה, ובין גדלי, מיקרו שהם אפיונים של המודל, בו משתמשים כדי להציג את העולם, אותו ,איננו רואים. כזאת היא משוואת (7).

נפרש עוד יותר את התוצאה (7) שקיבלנו. באגף השמאלי שלו נזהה את הביטוי עבור האנרגיה הקינטית של חלקיק בעל מסה m, אותה גם נכנה אנרגיה ממוצעת של חלקיק אחד בתוך הגז $< E_1^{kin} >$:

$$< E_1^{kin} > = \frac{1}{2} m \cdot < v^2 > \qquad (8)$$

על סמך ביטוי זה נקבל עבור הלחץ של הגז:



$$\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} m \cdot < v^2 > \cdot n = \frac{2}{3} E_1^{kin} \cdot n = P$$

או:

$$P = \frac{2}{3} E_1^{kin} \cdot n \qquad (9)$$

משוואה (9) פרושה:

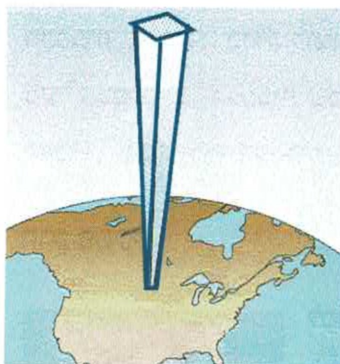


הלחץ בתוך הגז נקבע על ידי **האנרגיה הקינטית הממוצעת** של חלקיקי הגז **וצפיפותם**

משוואה (9) מכונה גם **משוואת המצב של הגז.** על ידי קבלת משוואה זו הדגמנו, כיצד **הפיזיקה הסטטיסטית** מופעלת על **התרמודינמיקה.** בהמשך נביא דוגמה חשובה נוספת להישגים המרשימים של הפיזיקה הסטטיסטית בהבנת מהות הגזים.

הלחץ האטמוספרי

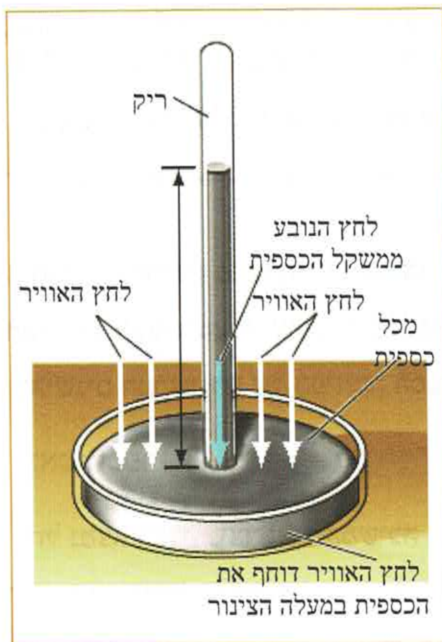
כאשר נוזל נמצא בכלי, נוצר עקב המשיכה הגרביטציונית לחץ הידרוסטטי בתוך הנוזל, בו לוחצות שכבות הנוזל האחת על השנייה. שיקולים זהים מביאים אותנו למסקנה בדבר קיומו של לחץ בתוך הגז, אם כי המצב בגז הוא שונה, שכן צפיפות הגזים היא קטנה בהרבה מזו של הנוזלים, וניתנת בקלות לשינוי (ידועה שקל לדחוס גז וקשה מאוד לדחוס נוזל).



שכבת האוויר, העוטפת את כדור הארץ, האטמוספרה, משתרעת עד לגובה של עשרות קילומטרים, אם כי בירידה מתמדת של הצפיפות. לאדם קשה לנשום כבר מגובה של כחמישה קילומטרים, ואי-אפשר לנשום החל מגובה של כ-10 ק"מ. שרידים דלילים של האטמוספרה מגיעים עד לגובה של כ-100 ק"מ ויותר.

עקב המשיכה הגרביטציונית לוחצות שכבות האוויר זו על זו וכך נוצר לחץ, הנקרא "לחץ אטמוספרי", אותו הזכרנו כבר בהקשר לתכונות הנוזלים (כלים שלובים, סיפון ואחרים).

על פני כדור הארץ מגיע הלחץ האטמוספרי עד לגודל של כ- $10\ N/cm^2$. לחץ אינו מורגש על ידנו מסיבה פשוטה, שהוא קיים גם בתוך גופינו, אחרת הוא היה מוחץ אותנו. האופי הלא מורגש של לחץ האוויר גרם לכך, שאת עצם קיומו של לחץ זה, ואת אופן מדידתו, הראה טוריצ'לי רק במאה ה-17 , בניסוי שהצגנו ונזכיר אותו שוב.



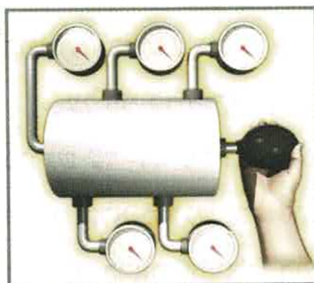

אוונג'ליסטה טוריצ'לי
1647 - 1608

טוריצ'לי הכין צינור זכוכית שאורכו כמטר, הסגור מצדו האחד, הוא מילא אותו בכספית, והפך אותו לתוך צנצנת שטוחה, גם היא מלאה בכספית (תרשים). כפי שציפה, הכספית לא ירדה כולה לתוך הצנצנת, אלא ירדה במקצת והתייצבה ברמה של כ- 76 ס"מ מעל המפלס של הכספית שבצנצנת.
כאמור, גובה עמוד הכספית מעיד על גודל הלחץ האטמוספרי הקיים.

חוק פסקל


בלז פסקל
1662 – 1623

למדנו, שבהפעלת לחץ על הנוזל מועבר לחץ זה במידה שווה לכל הכיוונים בנוזל, ומגיע לכול הנקודות שבתוך הכלי. תכונה זו מקורה באיזוטרופיות (שקילות הכיוונים) בתוך הנוזל מבחינת התכונות ויכולת התנועה של חלקי הנוזל השונים. טענה זו תקיפה לגבי כול הזורמים, כלומר, היא כוללת גם גזים. הייחודיות של



הגזים היא היכולת להידחס, תכונה שאינה עומדת בסתירה למעבר הלחץ לכול כיוון – חוק פסקל.

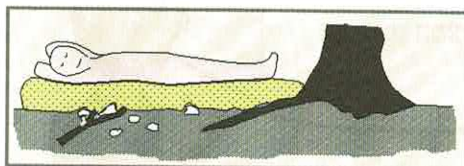
התופעה בולטת יותר בכלי סגור. ניתן להדגים זאת עבור גז, הנמצא במיכל. כאשר נדחוס את הגז באמצעות הפומית לתוך המיכל נראה, שכל מדי הלחץ מראים גידול שווה.



חוק פסקל תקף עבור הגזים:
לחץ המופעל על גז שבכלי סגור, מתפשט במידה שווה לכל חלקי הגז ולכל הכיוונים.

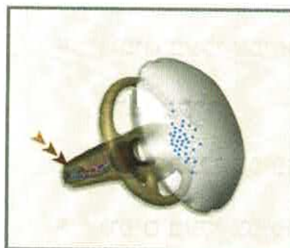
נדגים יישומים טכנולוגיים, אותם ניתן להסביר על סמך חוק פסקל.

1. מזרון אוויר



הלחץ הגבוה, אותו מפעילים האבנים הפזורות על השטח, בו פרוס המזרון, אינו מורגש על ידנו, כאשר אנו שוכבים על המזרון. מדוע? ההסבר לכך מתבסס על חוק פסקל. לחץ האבנים מועבר באותה המידה על כל שטח המגע שבין הגוף למזרון, והופך ללא מורגש עבורנו.

2. כרית אוויר



כרית האוויר נפתחת בזמן תאונה (בלימה חזקה) של הרכב לפני הנוסעים בו. הלחץ שנוצר, אם גוף הנוסע היה מתנגש בחלקים השונים של המכונית, ההגה או המדף הקדמי, מתפזר באופן שווה לכל חלקי הכרית בהתאם לחוק פסקל. פיזור אחיד של הלחץ מקטין מאוד את הנזק לגוף האדם בזמן ההתנגשות.

חוק ארכימדס

כאמור, חוק ארכימדס הומצא בקשר לנוזלים. החוק נוסח באופן הבא:



על גוף השקוע בתוך נוזל פועל כוח עילוי, השווה
למשקל הנוזל הנדחה על ידו

אם נחשוב על שקילה של גוף השקוע בתוך נוזל, ניתן לטעון, שגוף כזה "מאבד" בתוצאת השקילה כמשקל הנוזל, הנדחה על ידו. נזכיר, שגוף כזה אינו מאבד ממשקלו ממש, אלא חלק מן המשקל מופעל על הנוזל, ולא נמדד על ידי המאזניים.

היות ולגזים תכונות דומות לנוזלים מבחינת מעבר הלחצים בתוך התווך (ומכך התקיפות של חוק פסקל בגזים), ניתן לצפות, שבאופן דומה יהיה תקף עבור הגזים גם חוק ארכימדס. הניסוח החדש יהיה:

על גוף, המצוי בתוך תווך של גז, פועל כוח עילוי, השווה
למשקל הגז, הנדחה על ידו



כמו בתוך הנוזלים גופים באוויר יכולים להיות במצב של ריחוף (ציפה), במצב של עלייה למעלה או במצב של שקיעה (ירידה למטה). התנאים לכל מצב כזה דומים לאלה, שקבענו בהקשר לנוזלים. דהיינו:

- גופים בעלי צפיפות (אחידה או ממוצעת) הקטנה מזו של האוויר: $\rho < \rho_0$, יעלו בו כלפי מעלה;
- גופים בעלי צפיפות השווה לזו של האוויר: $\rho = \rho_0$, ירחפו;
- גופים בעלי צפיפות גדולה מזו של האוויר: $\rho < \rho_0$, ישקעו בגז (ירדו למטה).



יישום חשוב ומפורסם של חוק זה בהיסטוריה של המדע הוא **כדור פורח**.

בשנת 1783 הרשימו האחים מונגולפייה את בני זמנם, כאשר עלו לראשונה בתא של כדור פורח פתוח מלמטה, כאשר הפעילו תנור, המחמם את האוויר בתוך הבלון.

נסביר את עיקרון פעולתו של כדור פורח, ונפרט את המצבים, בהם הוא שרוי.

כדור פורח הוא בלון גדול ומלא באוויר חם או בגז בעל צפיפות נמוכה (מימן או הליום). תא מטען ובו נוסעים וחפצים מחובר לבלון מלמטה (תרשים). כוח העילוי, הפועל כלפי מעלה, פועל במנוגד לכוח הכובד. כזכור, כוח העילוי שווה ל:

$$F_A = \rho_0 \cdot V \cdot g \qquad (10)$$

כאשר V הוא נפח הבלון, ρ_0 הוא צפיפות האוויר, ו-g – תאוצת הנפילה החופשית. וכוח הכובד שווה למשקלו של הגוף כולו:

$$W = \rho \cdot V \cdot g \qquad (11)$$

כאשר ρ הוא צפיפות של הגז, הכלוא בתוך הבלון.

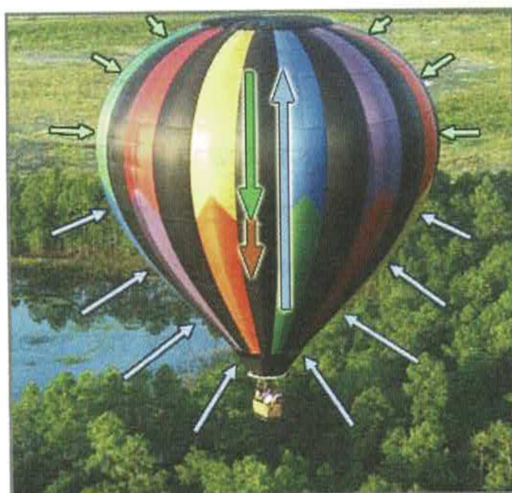
בוחרים את הגז, הממלא את הכדור, כך, שכוח העילוי נעשה גדול מכוח הכובד ($\rho_0 > \rho$), והכדור שואף לעלות כלפי מעלה:

$$F_A > W \qquad (12)$$

במצב זה יש אפשרות לחבר לבלון תא מטען במשקל W_B כזה, שמושג מצב של שיווי משקל של הכוחות:

$$F_A = W + W_B \qquad (13)$$

כך נוצר מצב של שיווי משקל, והכדור הפורח יחד עם תא המטען צף (מרחף) באוויר. כדי לגרום לכדור הפורח, המופעל באמצעות אוויר חם, לעלות, מחממים את האוויר בתוך הבלון קצת יותר, צפיפות האוויר שבכדור קטנה, ומשקל הכדור W יורד. כאשר מפסיקים לחמם את הכדור הפורח, צפיפות האוויר שבתוכו גדלה, משקלו עולה והכדור הפורח יורד מטה.



בכדורים פורחים, הממולאים בגז, שצפיפותו קטנה מזו של האוויר, משנים את גובה הריחוף על ידי ריקון גז ממעטפת הבלון (ירידה), או על ידי שינוי משקלו של תא המטען על ידי ריקונו (הפלת שקי חול שהוכנו למטרה זו). לכדור פורח חשיבות רבה בחקר האטמוספרה בשכבות העליונות, לשם לא מגיעים כלי הטייס. כדורים כאלה נושאים למעלה מעבדה שלמה למחקר אסטרופיזי ולחיזוי מזג האוויר.

חוק בויל - מריוט

כאמור, תכונה חשובה ובולטת במיוחד של הגז היא יכולתו להידחס, כלומר, לשנות את הנפח בהשפעת , לחץ חיצוני. ברור, שקיימת חוקיות בקשר זה שבין הלחץ לבין הנפח של כמות מסוימת של גז.

חוקיות זו נחקרה על ידי מדען אנגלי בויל, אשר פרסם את החוק בשנת 1662 באנגליה. בצרפת חקר את אותה החוקיות מדען אחר בשם מריוט, שפרסם את החוק בשנת 1676. החוק קרוי באנגליה חוק בויל, בצרפת - חוק מריוט, וביתר העולם חוק בויל- מריוט.



רוברט בויל
1627-1691



אדם מריוט
1620-1684

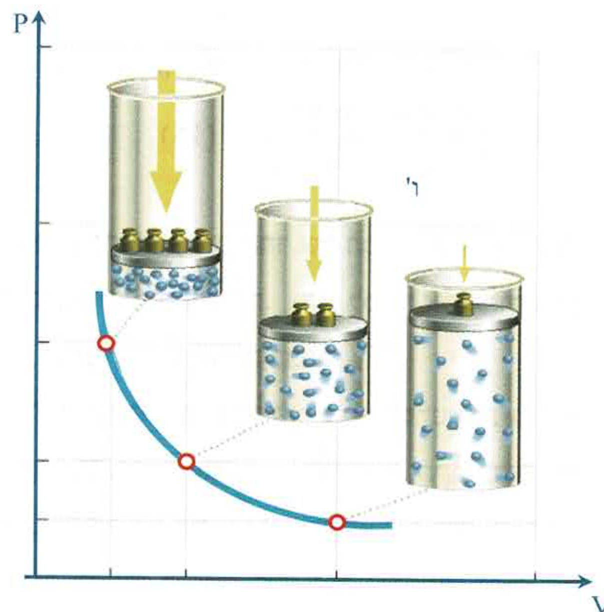
נדגים את החוק:

ניקח בוכנה מלאה בגז, ונעמיס על הבוכנה משקולות (תרשים ה').

ה'



הבוכנה יורדת ומקטינה את נפח הגז. כאשר היא נעצרת, אנו מבינים, שהושג שיווי משקל חדש, המעיד על עליית הלחץ הפנימי של הגז. כך, על ידי שינוי בגודל המשקולת (המעיד על הלחץ בתוך הגז) ומדידת נפח הגז, התואם לשיווי משקל לכל משקולת, נוכל ללמוד על הקשר שבין לחץ ובין נפח של כמות מסוימת של גז. נוודא גם, שהמדידות תתבצענה באותה טמפרטורה. את הקשר המתקבל ניתן להציג בעזרת הגרף (תרשים ו').



הנתונים מראים, שקיים יחס הפוך בין נפחו V של הגז לבין הלחץ P, השורר בו. זאת כאשר הטמפרטורה של הגז נשארת ללא שינוי. (בניסוי הדחיסה מלווה בעליית מסוימת של הטמפרטורה, אך ניתן לחכות, עד שהיא חוזרת לאותו ערך בהשפעת הסביבה, ואז לרשום את גודל הנפח החדש של הגז).

את היחס ההפוך בין P ו-V ניתן לבטא על ידי הטענה השקולה, שהמכפלה של שני הגדלים נשארת קבועה. כלומר, באופן מתמטי החוק מיוצג על ידי הביטוי:

$$P \cdot V = K_t \qquad (14)$$

כאשר K_t הוא קבוע עבור טמפרטורה מסוימת וכמות גז נתונה.



חוק בויל- מריוט קובע שעבור מסה נתונה של גז בטמפרטורה מסוימת מכפלת הלחץ בנפח נשמרת

ניתן גם לבטא את החוק באופן אחר, השקול לביטוי (14):

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \qquad (15)$$

כאשר P_1 ו-V_1 הם הלחץ והנפח במצב אחד של הגז, ו P_2 ו- V_2 הם הלחץ והנפח במצב אחר של אותה כמות גז באותה טמפרטורה. נהוג לכנות את החוק בשם **החוק האיזותרמי** (איזו= שווה ביוונית), כלומר בטמפרטורה קבועה.

המשך המחקר הראה, שבלחצים, בצפיפויות ובטמפרטורות גבוהות החוקיות הפשוטה שהצגנו אינה מדויקת. החוק, כפי שנוסח על ידי בויל, תקף עבור גזים, אותם אנו מכנים "אידיאליים". כאמור, המודל של הגז, בו אנו משתמשים הוא מודל הגז האידיאלי. במודל זה חלקיקי הגז מיוצגים על ידי כדורים ללא נפח (נקודות) וללא השפעה הדדית (מחוץ להתנגשויות). אכן, בתנאים רגילים של לחץ, צפיפות וטמפרטורה חוק בויל-מריוט תקף בהחלט, זוהי ההצדקה להמשיך ולהשתמש בו, למרות מגבלות המודל.

יישומים

ידיעת חוק בויל-מריוט מאפשרת להסביר את פעולתם של מכשירים שונים: משאבה, מזלף, מדחס ועוד. נדגים זאת לגבי פעולתם של שני מכשירים חשובים מאוד: משאבה ומזלף.

1. משאבה יונקת-דוחסת



הרמת ידית הבוכנה בתוך המשאבה גורמת להגדלת נפח הגז בתוך התא ("הצילינדר") של המשאבה. הגדלה הנפח גורמת להקטנה של לחץ האוויר, הכלוא בחלל זה, בהתאם לחוק בויל-מריוט. את הלחץ המוקטן מכנים "תת- לחץ" (או אפילו "ואקום", למרות שואקום" הוא מונח עבור "ריק"). מכל מקום, יצירת הפרש

הלחצים בין החלק הפנימי והחלק החיצוני של המשאבה גורם ליניקת הנוזל או, הגז המצוי מחוץ למשאבה. ובשלב הבא, כאשר מורידים את ידית הבוכנה, מקטינים את נפח החלל, ולחץ האוויר בחלל גדל. עדות לכך היא הקושי המורגש בהורדת ידית הבוכנה. הלחץ הגבוה גורם לזרימה של הגז או של הנוזל בכיוון הרצוי.

2. מזלף



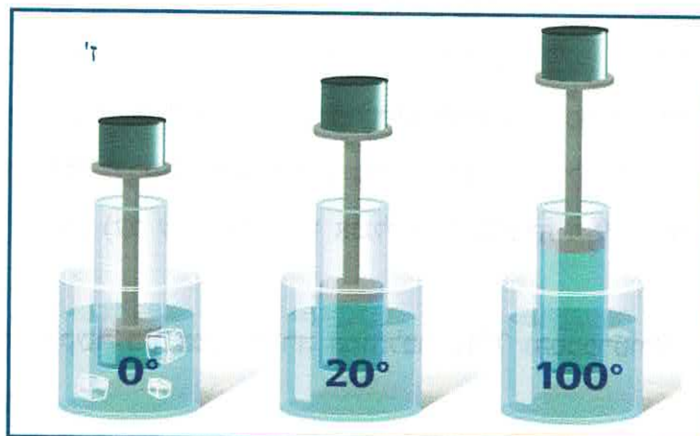
לוחצים על גומיית המזלף, ומכניסים את פתחו לתוך כלי עם נוזל, ומרפים מהגומייה. הודות לאלסטיות של הגומייה היא חוזרת לצורתה ההתחלתית (ללא לחץ). בעקבות כך, נוצר חלל גדול, ובו שורר לחץ, הקטן מן הלחץ האטמוספרי. הפרש לחצים זה גורם לעליית המים בצינור המזלף.

חוק גי-לוסק


לואי גי-לוסק
1778-1850

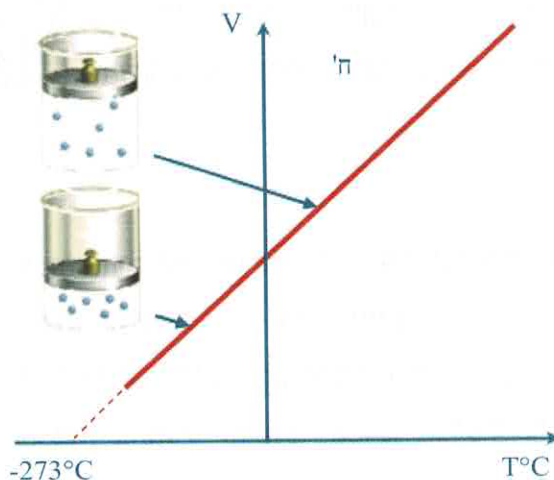
כאמור, חוק בויל-מריוט הציג את החוקיות, הקיימת בתהליך, בו נשמרת הטמפרטורה – תהליך איזותרמי. עתה נציג תהליך, בו נשמר הלחץ קבוע. תהליך זה מכונה איזוברי (שווה לחץ ביוונית). את החוקיות בתהליך זה חקר המדען הצרפתי גי-לוסק בשנת 1802. החוקיות, שגילה באופן ניסיוני, הייתה הקשר בין הנפח ובין הטמפרטורה של הגז, כאמור, כאשר הלחץ נשאר ללא שינוי.

נדמיין את הניסוי המייצג חוקיות זו (תרשים ז').



בוכנה ניידת בה כמות מסוימת של אוויר מצויה בסביבות, בהן יש טמפרטורה שונה. מיקום הבוכנה משתנה בהתאם לסביבה, ועל כך מעיד הנפח שתופס הגז. משקולת קבועה, המונחת על הבוכנה, מבטיחה את הלחץ הקבוע בתוך הבוכנה, כפי שרצינו. התוצאות מעידות על כך, שקיים קשר בין נפח הגז ובין הטמפרטורה שלו, והקשר הוא יחס ישר, כלומר: עליית הטמפרטורה של האוויר מלווה בהתפשטות האוויר.

בניסוים שערך גי-לוסק התברר, שגזים רבים מראים קשר זהה באופיו. בהתאם, הביטוי הגראפי של חוקיות זו הוא קו ישר (תרשים ח').



הקו הישר אותו העביר גי- לוסק, חתך את ציר הנפח והמשיך לרדת עם ירידת הטמפרטורה. התברר שקו זה, אם נמשיך אותו לטמפרטורות נמוכות במיוחד, שאז לא היו זמינות בכלל, חותך את ציר הטמפרטורות בנקודה -273°C. בטמפרטורה זו היה אמור להתאפס נפח הגז. ערך זה של הטמפרטורה מציע את הסולם החדש של הטמפרטורה, שזהה לסולם של צלסיוס, אך מוזז ממנו בדיוק ב-273°. סולם זה של הטמפרטורות מכונה סולם של קלווין (על שמו של מדען אנגלי דגול מהמאה ה-19), או סולם הטמפרטורה המוחלטת.

כלומר, הקשר בין הטמפרטורה המוחלטת T°K והטמפרטורה בסולם של צלסיוס T°C הוא:



צלסיוס

$$T°K = T°C + 273° \qquad (16)$$



קלווין

לדוגמה, הטמפרטורה המוחלטת של קיפאון המים תהיה: $0°C + 273° = 273°K$,
וטמפרטורת הרתיחה של המים תהיה בסקלה זו: $100°C + 273° = 373°K$.

כאשר משתמשים בסולם החדש של טמפרטורות, מתקבל הקשר אותו מצא גי-לוסק בצורה:

$$\frac{V}{T} = K_P \qquad (17)$$

כאשר V – הוא הנפח של כמות גז מסוימת, T – הטמפרטורה המוחלטת שלו, ו-K_P הוא קבוע עבור לחץ מסוים, הנשאר ללא שינוי בתהליך, בו משתנים הנפח והטמפרטורה.

כידוע, קשר ישר מהסוג הניתן על ידי ביטוי (17), ניתן גם להציג אחרת, כלומר, שוויון היחסים בין המשתנים V ו-T:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad (18)$$

כאן T_1 ו- T_2 הן זוג טמפרטורות מוחלטות כלשהן, ו-V_1 ו-V_2 הם הנפחים המתאימים של אותה כמות של גז בטמפרטורות T_1 ו- T_2.

חוק גי-לוסק קובע שהנפח של כמות מסוימת של גז נמצא ביחס ישר לטמפרטורה המוחלטת בתהליך איזוברי (שווה לחץ)



חוק גי-לוסק חשוב להבנת התהליכים המתרחשים בכלי פתוח, בו שורר לחץ אטמוספרי. ביטוי אחר לאותה חוקיות ניתן לצפות כשכדור פורח עובר מאזור, בו טמפרטורת האוויר T_1, לאזור, בו טמפרטורת האוויר T_2, נמוכה יותר. במצב זה נפחו של הכדור קטן.

גם בהקשר לחוק גי-לוסק, בדומה לחוק בויל- מריוט, מתברר, שתקפותו מוגבלת לגז אידיאלי. סטייה משמעותית חלה בטמפרטורות נמוכות מאוד, כאשר החוק מנבא את קריסת הנפח עד לאפס. זה לא קורה, ומודל הכדורים הקטנים ללא נפח עצמי וללא השפעה הדדית (גז אידיאלי) נכשל.

דוגמה



כדור פורח בעל נפח $1100m^3$ מרחף בשכבת אוויר בטמפרטורה של $27°C$. באיזו מידה יפחת נפח הכדור, כאשר יעבור לאזור בו טמפרטורה של אוויר היא $0°C$ (ניתן להניח כי לחץ הגז נשאר ללא שינוי)?

פתרון:

היות ולחץ הגז הוא קבוע, ניתן להשתמש בחוק גי-לוסק עבור הגז בתוך כדור פורח. עבור שני המצבים, שהוזכרו בבעיה, נרשום:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

נציב את הנתונים שהוזכרו ונעבור לטמפרטורות בסולם של קלווין:

$$\frac{V_2}{1100m^3} = \frac{273°K}{273° + 27°}$$

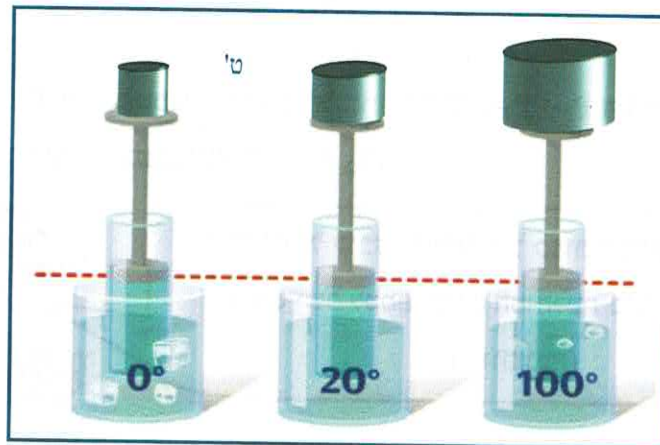
נבודד נפח V_2 ונקבל:

$$V_2 = 1001m^3$$

כלומר שינוי בנפח הכדור הוא: $99\ m^3$.


ג'קוז שארל
1746-1823

הצגנו את חוקיות הגזים בתהליכים **איזותרמי** (חוק בטויל-מריוט) **ואיזוברי** (חוק גי-לוסק). בין האפשרויות השונות נשאר רק תהליך **איזוחורי** (שווה נפח). מדובר בחוקיות בתהליך, בו הגז הכלוא בתוך כלי סגור, בעל נפח שלא משתנה. חוקיות זו נחקרה על ידי המדען הצרפתי שארל בשנת 1787.



לצורך הדגמה של חוק שארל ניקח שוב משורה, הנסגרת על ידי בוכנה (תרשים ט'). המשורה כוללת כמות מסוימת של אוויר בטמפרטורה מוחלטת T_1. נפח האוויר הוא V, והמשורה סגורה על ידי בוכנה, עליה מונחת משקולת בגודל W_1. כאשר נעביר את המשורה לתוך אמבט מים חמים, והגז יתחמם עד לטמפרטורה T_2, נגלה, שעל מנת שהגז ישמור על הנפח V ללא שינוי, יש צורך במשקולת גדולה יותר – W_2. הדבר מעיד על עליית הלחץ של הגז בתוך המשורה. גודל המשקולת W , הגורמת כל פעם לשיווי משקל של הבוכנה, מעיד גם על גודל הלחץ בתוך המשורה. הרי הלחץ הוא (בהזנחת משקל הבוכנה עצמה וכאשר שטח הבוכנה הוא A):

$$P = \frac{W}{A}$$

לאחר מספר מדידות בטמפרטורות שונות, נגיע למסקנה על החוקיות, הקיימת בתהליך איזוחורי של הגז. אם נשתמש בסולם של הטמפרטורות המוחלטות, נקבל את הקשר אותו מצא שארל בצורה:

$$\frac{P}{T} = K_V \qquad (19)$$

כאשר P – הוא הלחץ של כמות מסוימת של גז, T – הטמפרטורה המוחלטת שלו, ו-K_V הוא קבוע עבור נפח וכמות מסוימת של הגז, הנשארים ללא שינוי במהלך תהליך, בו משתנים הלחץ והטמפרטורה.

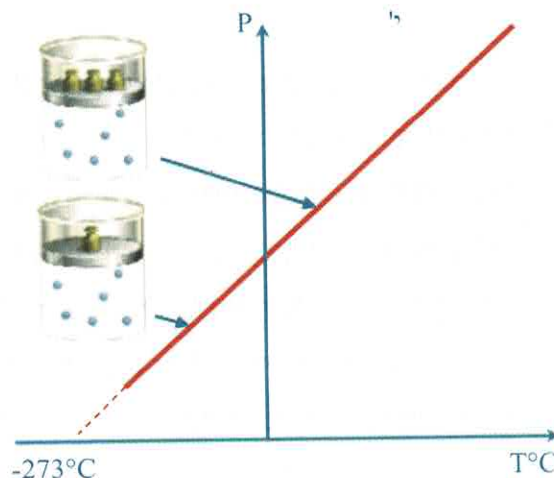
כאמור, קשר ישר מהסוג הניתן על ידי ביטוי (19), ניתן להציג גם כשוויון יחסים בין המשתנים P ו-T:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \qquad (20)$$

כאן T_1 ו- T_2 הן זוג טמפרטורות מוחלטות כלשהן, ו-P_1 ו-P_2 הם הלחצים המתאימים של אותה כמות של הגז בטמפרטורות T_1 ו- T_2.



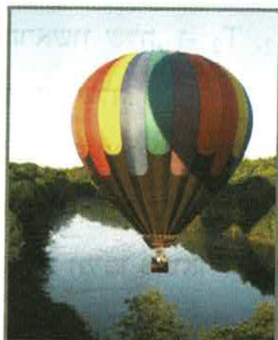
חוק שארל קובע שהלחץ של כמות מסוימת של גז נמצא ביחס ישר לטמפרטורה המוחלטת בתהליך איזוחורי (שווה נפח)



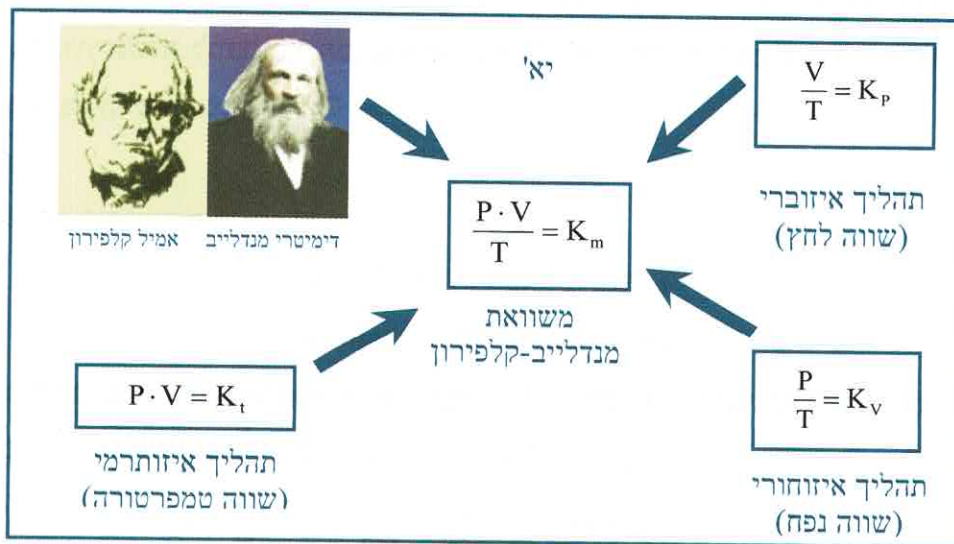
תרשים י' מציג את החוקיות, הקיימת לפי חוק שארל, באופן גראפי. בדומה למקרה של חוק גי-לוסק, גרף הלחץ כפונקציה של הטמפרטורה הוא קו ישר, והמשכו פוגש את ציר הטמפרטורה בנקודה -273°C. תכונה זו מזמינה שימוש בטמפרטורה מוחלטת (סולם מעלות קלווין), כפי שנעשה בביטויים (19) ו-(20).

כאמור, לחוק שארל חשיבות בתיאור התהליכים, המתרחשים בכלים סגורים, ללא שינוי בנפח. חוק זה מספק קירוב טוב לתיאור צמיג המכונית בנסיעה: הצמיג מתחמם, אך נפחו נשמר. כידוע, גם כאשר הצמיג נמצא בשמש, הוא מתוח יותר , בגלל עליית הלחץ בתוכו. דוגמה אחרת היא דוד סגור, אשר בו מתחמם גז. יש לקחת בחשבון את עליית טמפרטורת הסביבה ועקב כך את עליית הלחץ של הגז, הכלוא בדוד.

משוואת המצב של הגזים



שלושה גורמים קובעים את מצבו של הגז (בכמות מסוימת): הנפח – V, הטמפרטורה המוחלטת – T, ולחצו – P. בהתאם, הצגנו שלושה סוגים של תהליכים אפשריים: איזותרמי (חוק בויל-מריוט), איזוברי (חוק גי-לוסק) ואיזוחורי (חוק שארל). ברורה אם כן שאיפת המדענים לאחד את שלושת החוקים לחוק אחד מקיף, הכולל את כל שלושת החוקים כמקרים פרטיים. מצב כזה למשל, מתרחש בגז שבתוך הכדור פורח, כאשר גם הנפח, גם הלחץ וגם הטמפרטורה משתנים. במשימה מחקרית זו הצליחו שני המדענים מנדלייב (ברוסיה), וקלפירון (בצרפת), שעבדו במאה ה-19. מתברר גם שאין צורך ללכת שוב למעבדה: קיומם של שלושת החוקים הניסיוניים (14), (17) ו-(19) מחייב את קיומו של חוק כללי, אותו נציג בתרשים יא'.



משוואת מנדלייב-קלפירון (21):

$$\boxed{\frac{P \cdot V}{T} = K_m} \qquad (21)$$

תקפה עבור כמות מסוימת (מסה m) של גז, ועל כך מעיד הקבוע K_m. כפי שכבר עשינו בכל שלושת החוקים, ניתן להציג את החוק של מנדלייב-קליפרון באופן אחר:

$$\boxed{\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}} \qquad (22)$$

כאשר P_1, V_1, T_1 הם הלחץ, הנפח והטמפרטורה של כמות מסוימת של גז במצב הראשון שלה, ו- P_2, V_2, T_2 הם הלחץ, הנפח והטמפרטורה של אותה כמות גז במצב האחר שלה.

משוואת מנדלייב-קלפירון (21) מכונה גם בשם "משוואת המצב של גז אידיאלי". היא מקשרת בין שלושת הגורמים, המגדירים את מצבו של הגז (P, V, T). הליום, חנקן, חמצן ומימן מתוארים יפה על ידי משוואה זו, אך רק בתנאים שאינם רחוקים מ"רגילים". בתנאי לחץ גבוהים למשל, משוואה (21), כמו שאר משוואות הגזים, אינה תואמת למציאות, והיא זקוקה לתיקונים. המודל היותר מציאותי, אותו הציע המדען ההולנדי **ואן דר וואלס**, לוקח בחשבון את ההשפעה ההדדית שבין חלקיקי הגז, ואת העובדה שלחלקיקים נפח עצמי מסוים.

דוגמה

כאשר כדור פורח נמצא ליד הקרקע, וטמפרטורת הגז, הממלא אותו, היא 27°C, נפחו הוא V. הכדור נשלח לגובה, בו הטמפרטורה היא 33°C-, והלחץ בסביבה קטן פי שתיים. באיזה מידה ישתנה נפח הכדור?

פתרון

נעבור לטמפרטורות בסולם קלווין:

$$T_1°K = 27°C + 273° = 300° K$$

$$T_2°K = -33°C + 273° = 240° K$$

נשתמש במשוואת המצב בצורה של הביטוי (22), ונשווה בין שני המצבים, בהם מצוי הכדור פורח. נתחשב בירידת הלחץ פי שנים ונקבל:

$$\frac{P \cdot V_1}{300° K} = \frac{P/2 \cdot V_2}{240° K} \Rightarrow \qquad \frac{V_1}{300} = \frac{V_2}{480} \Rightarrow \qquad \frac{V_2}{V_1} = 1.6$$

כלומר, בעליית הכדור לגובה נפח הכדור גדל פי 1.6 .

מהי הטמפרטורה?

נסיים בתשובה לשאלה הנשאלת מאז הגדירו אנשים לעצמם את המושגים חום וטמפרטורה: מה עומד מאחורי המושג טמפרטורה? עתה נוכל לענות על שאלה זו באמצעות הגישור בין התרמודינאמיקה (תיאורית המקרו) לפיזיקה הסטטיסטית.

בתחילת הפרק השתמשנו במודל הפשוט ביותר של גז (כדורים ללא נפח, המפוזרים בחלל, ונעים באופן אקראי). הפעלנו את חוקי ניוטון למודל זה, וקיבלנו את משוואת המצב של הגז שצורתה:

$$\frac{1}{3}m\cdot <v^2>\cdot n = P \qquad (7)$$

או:

$$P = \frac{2}{3}E_1^{kin}\cdot n \qquad (8)$$

אלו הן התוצאות של הפיזיקה הסטטיסטית. לאחר מכן הכרנו את משוואת המצב מבחינת התרמודינמיקה (משוואת מנדלייב-קלפירון):

$$\frac{P\cdot V}{T} = K_m \qquad (21)$$


רודולף קלאוזיוס

משוואות (7, 8) ומשוואה (21) - שתיהן משוואות המצב של גז, וטבעי להשוות ביניהן. זה מה שעשה המדען הגרמני קלאוזיוס בשנת 1857. נשווה בין משוואה (8) ומשוואה (21), לאחר שנפרט את משמעות צפיפות החלקיקים n על ידי הביטוי: n=N/V (N מספר חלקיק גז, ו-V נפח שלו). נקבל השוואה בין הביטויים:

$$P\cdot V = K_m\cdot T \qquad\qquad P\cdot V = \frac{2}{3}E_1^{kin}\cdot N$$

תרמודינאמיקה  פיזיקה סטטיסטית

ההשוואה מביאה אותנו למסקנה לגבי הקשר, הקיים בין הטמפרטורה של הגז ובין האנרגיה הקינטית הממוצעת של חלקיק הגז:

$$\boxed{T = \frac{2}{3}\cdot\frac{N}{K_m}\cdot E_1^{kin}} \qquad (22)$$

או:

$$T = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{K_m} \cdot m < v^2 > \qquad (23)$$



הטמפרטורה של הגז נקבעת על ידי **האנרגיה הקינטית הממוצעת** של חלקיקי הגז. כלומר, נכון גם לומר, שגודלה של **מהירות** חלקיקי הגז קובעת את **הטמפרטורה** שבו.



כבר למדנו, ש**הלחץ** בתוך הגז נקבע על ידי **האנרגיה הקינטית הממוצעת** של חלקיקי הגז ו**צפיפותם**.

מסקנות אלו מסבירות את מהות המושגים: **טמפרטורה** ו**לחץ** בתורת הגזים. תורה זו מכונה:

התורה המולקולארית- קינטית של הגזים.

תאוריה זו הבהירה את המושגים, בהם השתמשו אנשים רק באופן אינטואיטיבי ולא מדויק.



רק על סמך המודלים של הפיזיקה הסטטיסטית לגבי העולם הלא נראה של החלקיקים ניתן היה להבין את הסיבות לחוקי הגזים, שנקבעו באופן ניסיוני.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1. כאשר כדור פורח עולה לגובה רב יותר, נפחו:



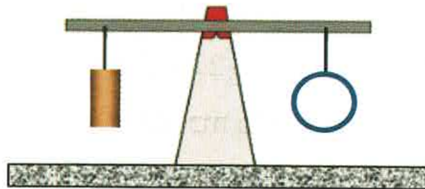
א. קטן.

ב. גדל.

ג. אינו משתנה.

ד. יכול לגדול, לקטון או להישאר קבוע.

2. משקולת, התלויה בקצהו האחד של מנוף, מאזנת כדור, התלוי בקצהו השני. אם נשים את המערכת בסביבת ריק:



א. הכדור יעלה.

ב. הכדור ירד.

ג. הכדור יישאר במקומו.

ד. לא ניתן יהיה לדעת, מה יקרה לכדור.

3. משקולת, התלויה בקצהו האחד של מנוף, מאזנת כדור, התלוי בקצהו השני. אם נכניס את המערכת למים:

א. הכדור יעלה.

ב. הכדור ירד.

ג. הכדור יישאר במקומו.

ד. לא ניתן יהיה לדעת, מה יקרה לכדור.

4. ממלאים כדור פורח ראשון בגז שצפיפותו ρ_1, וכדור פורח שני, הזהה לראשון, בגז, שצפיפותו ρ_2. $(\rho_2>\rho_1)$. האם נכון ש:

א. שניהם מסוגלים להרים אותו כובד של מטען ?

ב. הכדור השני מסוגל להרים מטען כבד יותר ?

ג. הכדור הראשון מסוגל להרים מטען כבד יותר ?

ד. לא ניתן לדעת, איזה כדור מסוגל לשאת משקל כבד יותר ?



5. דוחסים כמות מסוימת של גז לתוך כלי, הסגור באופן הרמטי.
כתוצאה מכך:
א. נפח הגז קטן.
ב. לחץ הגז גדל.
ג. הטמפרטורה של הגז עולה.
ד. כל התשובות נכונות.

6. באיזו טמפרטורה ישאף נפח הגז לאפס:
א. 0°C.
ב. 0°K.
ג. -273°C.
ד. תשובות ב' ו- ג' נכונות.

7. ממלאים שני כדורים פורחים, בעלי משקל ונפח זהים, באותה כמות של הליום.
הכדור הראשון קשיח יותר מהשני. כאשר ישחררו את שניהם:
א. הכדור הפורח הראשון יתרומם לגובה רב יותר.
ב. הכדור הפורח השני יתרומם לגובה רב יותר.
ג. שניהם יתרוממו לאותו גובה.
ד. לא ניתן לדעת, איזה כדור יתרומם לגובה רב יותר.



8. בשיעור ראשון לצלילה לומדים, לא לעצור את הנשימה בעלייה. הסיבה לכך היא:
א. לא להגדיל את נפח הריאות.
ב. לא להקטין את נפח הריאות.
ג. להקטין את הלחץ הפועל על הצוללן .
ד. כל התשובות אינן נכונות.

חוקי הגזים



1. נסחו את חוק פסקל בגזים, והדגימו חוק זה בעזרת ציור.

2. נסחו את חוק ארכימדס בגזים, וציינו את התנאים, בהם הגוף בתוך הגז שוקע, מרחף או עולה.

3. הסבירו, מדוע כדור פורח גמיש יכול להתרומם לגובה רב יותר מזה של כדור פורח הזהה לו במשקל, בנפח, והמלא באותה כמות של גז.



4. מדוע כדור עשוי גומי דק מתפוצץ, כאשר מכווצים אותו חזק בידיים?

5. הסבירו, מדוע גדל לחץ הגז בכלי סגור, כשמקטינים את נפחו.

6. א. מהו היחס בין נפח הגז לטמפרטורת הגז, כאשר הלחץ הוא קבוע?
   ב. מהו היחס בין נפח הגז ללחצו, כאשר הטמפרטורה היא קבועה?
   ג. מהו היחס בין לחץ הגז לטמפרטורה שלו, כאשר הנפח הוא קבוע?



7. בהתבסס על חוק בויל- מריוט, הסבירו את עקרון הפעולה של משאבת האופניים.

8. מהו סולם הטמפרטורה המוחלטת? על סמך ההבנה של מהות הטמפרטורה, הסבירו, מה עשוי לקרות באפס המוחלט של הטמפרטורה?

9. בהנחה שטמפרטורת הגז אינה משתנה:
   א. איך משתנה צפיפות הגז כתוצאה מעליית הלחץ החיצוני ,הפועל עליו?
   ב. פתחו נוסחה, שתתאר את הקשר בין צפיפותו של גז ללחצו.

10. במשאבת אופניים דוחסים את האוויר עד לשליש מנפחו המקורי. באיזו מידה גדל לחץ האוויר כתוצאה מכך? נמקו.



שאלות חישוב

1. גז בטמפרטורה של 20°C חומם, עד אשר לחצו ונפחו הוכפלו. חשבו את הטמפרטורה הסופית של הגז.

2. בקבוק זכוכית של משקה קל רוקן מהמשקה ונאטם הרמטית בטמפרטורת החדר 20°C. לאחר מכן הוכנס הבקבוק לתנור. כאשר טמפרטורת התנור הגיעה ל-500°C, התפוצץ הבקבוק. ידוע, שהלחץ האטמוספרי הוא $10^5\frac{N}{m^2}$. חשבו את הלחץ המכסימלי, אותו יכול הבקבוק לשאת.

3. צמיג של מכונית מכיל אוויר בלחץ של $2.4\cdot10^5\frac{N}{m^2}$ ובטמפרטורה של 15°C.
בקיץ טמפרטורת הצמיג עולה ל- 35°C. חשבו את לחץ האוויר שבצמיג בטמפרטורה זו.

4. בבלון מצוי גז בטמפרטורה של 17°C. מעלים את הטמפרטורה ל- 77°C, ונפח הבלון גדל ב- 15%. חשבו בכמה השתנה לחץ האוויר בתוך הבלון.

5. כאשר כדור פורח ריחף בשכבת אוויר בעלת טמפרטורה של 27°C, היה נפחו $1100m^2$.
בכמה יפחת נפח הכדור, לכשיעבור לשכבת אוויר אחרת, בה שוררת טמפרטורה של 0°C?

6. א. כיצד תשתנה טמפרטורת גז, כאשר נפחו יגדל פי 2 ולחצו יגדל פי 3?
ב. כיצד ישתנה נפח הגז, כאשר הלחץ יגדל פי 2 והטמפרטורה תרד פי 3?
ג. כיצד ישתנה לחץ הגז, כאשר הטמפרטורה תגדל פי 2 והנפח יקטן פי 2?

תשובות

1. 1172°K **2.** $2.638\cdot10^5\ N/m^2$ **3.** $2.56\cdot10^5 N/m^2$

4. P'= 1.0494 P **5.** $99m^2$

6. א) תגדל פי 6. ב) יקטן פי 6. ג) יגדל פי 4.

פרק כ"ט - התפשטות תרמית של מוצקים ונוזלים

על השינוי בצורת הגוף למדנו בהקשר של כוח אלסטי, הנוצר כאשר מנסים לעוות את הגוף. שינוי זה הוא שינוי של אנרגיה פנימית פוטנציאלית של חלקיקי הגוף, המתרחש עקב ביצוע עבודה של כוחות חיצוניים (כמו בקפיץ). במידה שונה כל גוף מוצק מראה תכונות של קפיץ: מתארך או מתכווץ בעקבות הפעלת כוח חיצוני. ואולם, כפי שלמדנו, ניתן גם לגרום לגוף לשינוי באנרגיה הפנימית בדרך נוספת, על ידי חימומו או קירורו של הגוף. כתוצאה מהספקת חום מתרחש לא רק חימום של הגוף (הגדלה של אנרגיה פנימית קינטית של חלקיקי הגוף), אלא גם התרחקות מסוימת בין החלקיקים (הגדלה של האנרגיה הפוטנציאלית שלהם). הביטוי החיצוני לכך הוא התארכותו או התכווצותו של הגוף. התופעה מכונה בפיזיקה **התפשטות תרמית**.



כתוצאה מחימום גופים עולה האנרגיה הפנימית הפוטנציאלית של החלקים שבתוכו, ומתרחשת **התפשטות תרמית** של הגוף – הוא משנה את מימדיו החיצוניים.



את ההתפשטות בחימום נוכל להסביר בכך, שכשטמפרטורת הגוף עולה, האטומים והמולקולות שבו מגבירים את תנועתם, וגם מתרחקים זה מזה. כתוצאה מכך מתפשט החומר.

תופעות רבות וחשובות קשורות בעובדה, שמימדיהם של גופים משתנים. זאת בגלל שחפצים שונים מורכבים למעשה מחלקים, העשויים מחומרים שונים. התפשטות שונה של חלקים אלה גורמת ללחצים פנימיים אדירים, ובעקבות כך החפצים מתעקמים, נסדקים ובסופו של דבר נשברים. כך תישבר כוס זכוכית עבה אליה נשפוך מים רותחים.

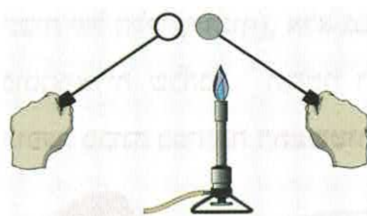
לפיכך, בתכנון של גשרים, פסי מסילת ברזל, מבנים, מטוסים וטילים יש להתחשב בכך, שהמרכיבים משנים את מימדיהם. לו לא היה הדבר כך, הוא היה עלול להביא לאסונות, כפי שהתרחשו לא פעם בעבר. בין המפורסמות ביותר הוא עובדת התרסקות

מעבורת החלל "צ'לינדז'ר" בעקבות הסדקים בטבעות הגומי בגופו של הטיל, סדקים שנוצרו לאחר לילה קר במיוחד לפני השיגור.

מרבית החומרים מתפשטים עקב חימומם ומתכווצים עם קירורם, אך ישנם גם אחרים המתנהגים הפוך, והם חשובים לא פחות, כמובן. כאלה הם, למשל, גומי, יציקת ברזל ומים בטווח הטמפרטורות בין 4°C ל-0°C.

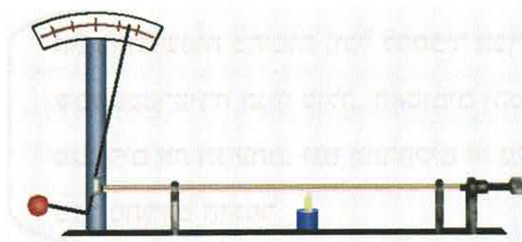
נדגים בניסויים את התופעה, כדי ללמוד עליה וכדי לדעת איך ניתן לחקור אותה.

ניסוי 1



ניקח כדור פלדה, נשחיל אותו דרך טבעת ונדאג לכך שקוטר הכדור יהיה קרוב מאוד לקוטר הטבעת, אך הכדור יוכל לעבור דרך הטבעת. נוציא את הכדור מהטבעת ונחמם אותו. עתה, לאחר החימום, נוכל להבחין בכך, שהכדור יתקשה לעבור דרך הטבעת, או שלאחר חימום ממושך יותר, הכדור לא ייכנס כלל לתוך הטבעת. בהדגמה זו אנו עדים לעובדה, שחימום יכול לגרום להתרחבות של כדור מתכת ולהגדלת נפחו.

ניסוי 2



נוכל לבדוק ביתר דיוק את הקשר בין אורכו של מוט מתכת לבין הטמפרטורה שלו. לשם כך נכין שלושה מוטות, העשויים מחומרים שונים: נחושת, אלומיניום ופליז, ונבדוק את מידת ההתארכות של כל אחד מהם, כאשר נחמם אותו במערכת שבתרשים.

קצהו האחד של המוט מוצמד לתומך ללא יכולת לנוע, והקצה השני נשאר החופשי. קצה זה ילחץ, אם יתארך, על מנגנון, הקשור למחוג, ויכול להסתובב. סטיית המחוג נמדדת מול הסקאלה, וכך נוכל לתעד את השינוי באורך המוט עם עליית הטמפרטורה שלו.

נחבר למערכת את המוטות, בזה אחר זה, ונחזור על הניסוי. נחזור על הניסוי גם עבור מוטות באורך שונה. התוצאות, המתקבלות, מעידות על כך, שהמתכות, אותן בדקנו, התארכו, אך גם מעבר לכך:

1. **מידת התארכות כל אחד מהמוטות מתרחשת ביחס ישר לעליית הטמפרטורה.**

2. **מידת התארכותו של כל אחד מהמוטות תלויה בחומר.**

3. **מידת התארכות של מוט תלויה באורך המוט.**

התפשטות "קווית" של מוצקים

נתאר את התופעה במונחים מדויקים יותר: התארכותו של מוט מתרחשת בכל קטע מאורכו. ברור, אם כן, שההתארכות של המוט כולו היא סכום ההתארכויות של כל חלקיו (תרשים).

לאור הבנה זו כדאי לדון לא בהתארכות הגוף כולו ΔL, אלא בהתארכות כל יחידת אורך שלו, או במילים אחרות, ההתארכות היחסית: $\frac{\Delta L}{L_0}$, כאשר L_0 הוא האורך ההתחלתי של המוט לפני החימום.

תוצאות הניסויים, מהסוג שתיארנו, מראות, שהתארכות הגופים מתכונתית לעליית הטמפרטורה, כלומר:

$$\frac{\Delta L}{L_0} \propto (t - t_0) = \Delta t \qquad (1)$$

כאן t מסמן טמפרטורה, t_0 – הוא הטמפרטורה בתחילת החימום, כאשר אורכו של הגוף הוא L_0.

כאמור, ההתפשטות התרמית תלויה גם בסוג החומר. ניתן לבטא תלות זו על ידי מקדם α בביטוי (1) מקדם הנקרא: ***מקדם התפשטות קווית*** של חומר:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot (t - t_0) \qquad (2)$$

או, עבור ההתארכות הכוללת של הגוף נקבל:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot (t - t_0) \qquad (3)$$

מביטויים 2 ו- 3 נובע, שהמשמעות של המקדם α היא ההתארכות ליחידת אורך של גוף, העשוי מחומר מסוים, המלווה בעליית הטמפרטורה במעלה אחת. ערכים אלו עבור חומרים שונים, כפי שנמדדו בטמפרטורה של $0°\ C$ צלזיוס, הובאו בטבלה.

על סמך ביטוי 3 נוכל גם לקבל גם את הביטוי עבור האורך L של הגוף כפונקציה של הטמפרטורה:

$$L = L_0 + \Delta L = L_0 + \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta t \qquad (4)$$

או:

$$L = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta t) \qquad (5)$$

נשים לב לגדלים הקטנים במיוחד של המקדם α. הדבר אינו צריך להטעות: גודל ההתארכות הכולל הוא גודל מצטבר, ויכול לגרום לשנויים משמעותיים.

ערכים של מקדם התפשטות תרמית קווית עבור מוצקים שונים 1/°C	
קרח	$4.0 \cdot 10^{-5}$
אבץ	$3.6 \cdot 10^{-5}$
עופרת	$2.9 \cdot 10^{-5}$
חמרן	$2.3 \cdot 10^{-5}$
כסף	$1.9 \cdot 10^{-5}$
פליז	$1.8 \cdot 10^{-5}$
נחושת	$1.6 \cdot 10^{-5}$
ברזל	$1.2 \cdot 10^{-5}$
זכוכית	$0.9 \cdot 10^{-5}$
אינוור	$0.2 \cdot 10^{-5}$



דוגמה

מחברים פס נחושת ופס אינוור ומקבלים מוט דו- מתכתי, שאורכו 60 cm. מה יהיה ההפרש באורך בין שכבות המוט, לאחר שיחומם מטמפרטורה של 20°C עד לטמפרטורה של 120°C?

פתרון:

בעזרת הטבלה נמצא את מקדם ההתפשטות הקווית של הנחושת ושל האינוור, ונחשב את אורכי הפסים לאחר החימום. לפי ביטוי (5) נקבל אורך חדש של פס הנחושת:

$$L = 60\text{cm} \cdot (1 + 1.6 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ C} \cdot 100^\circ C) = 60.096\text{cm}$$

עבור פס האינוור נקבל:

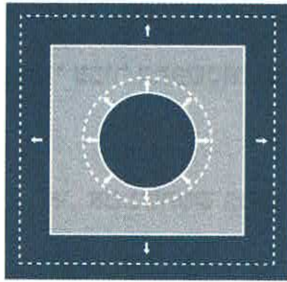
$$L_2 = 60\text{cm} \cdot (1 + 0.2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ C} \cdot 100^\circ C) = 60.012\text{cm}$$

מכאן, ההפרש באורכי הפסים הוא:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 60.096\text{cm} - 60.012\text{cm} = 0.024\text{cm}$$

הפרש אורכים זה גורם להתעקמות המוט הדו-מתכתי. בתכונה זו משתמשים ליצירת מד-חום, המבוסס על התופעה.

התפשטות תרמית של משטחים



את תיאור ההתפשטות הקווית של הגופים ניתן להרחיב להתפשטות של משטחי חומר. כידוע, שטח ניתן להציג כמכפלה של שני אורכים:

$$A = L_x \cdot L_y$$

אם כל אחד מהאורכים מתארך עקב החימום לפי ביטוי (5), נקבל עבור הגדלת השטח:

$$A = L_x^0(1+\alpha\cdot\Delta t)\cdot L_y^0(1+\alpha\cdot\Delta t) = L_x^0\cdot L_x^0(1+2\alpha\cdot\Delta t+\alpha^2\cdot\Delta^2 t)$$

בתוך ביטוי זה ניתן להזניח את האיבר, שכולל את α^2 בהשוואה לאיבר הכולל α ($\alpha << \alpha^2$) בנוסף, מופיע הביטוי לשטח A_0 שלפני החימום: $A_0 = L_x^0 \cdot L_y^0$. מכאן, הביטוי עבור ההתפשטות התרמית של משטחים:

$$A = A_0(1+2\alpha\cdot\Delta t) \qquad (6)$$

בביטוי זה נוהגים גם להשתמש במקדם ההתפשטות השטחית β במקום 2α:

$$A = A_0(1+\beta\cdot\Delta t) \quad (\beta=2\alpha) \quad (7)$$

ברור שהמשמעות של המקדם β היא השינוי היחסי של השטח, כשהטמפרטורה משתנה במעלה אחת.

כדאי לשים לב לכך, שההתפשטות הכללית של המשטח מלווה בהתפשטות של החורים שבו באותה מידה (תרשים).

התפשטות תרמית של גופים בעלי נפח

ברור, שגופים במציאות הם בעלי נפח. שינוי בטמפרטורה צריך לגרום לשינויים בנפח. נתאר תופעה זו באופן דומה לטיפול הקודם. נפח הגוף ניתן להציג כמכפלה של שטח באורך (גובה):

$$V = A\cdot L$$

נשתמש בביטויים (5) ו-(7), ונקבל ביטוי עבור תלות הנפח של גוף בטמפרטורה:

$$V = A_0(1+\beta\cdot\Delta t)\cdot L_0(1+\alpha\cdot\Delta t) = A_0\cdot L_0\cdot[1+(\alpha+\beta)\cdot\Delta t+\alpha\cdot\beta\cdot\Delta^2 t]$$

גם בתוך ביטוי זה ניתן להזניח איבר שכולל $\beta\cdot\alpha$ בהשוואה עם האיבר הכולל (β ,α) $\alpha+\beta$ הם מספרים קטנים). בנוסף, נזהה נפח V_0 שלפני החימום: $V_0 = A_0 \cdot L_0$. נקבל ביטוי עבור התפשטות תרמית של נפח:

$$V = V_0[1+(\alpha+\beta)\cdot\Delta t] \qquad (8)$$

או, אם נשתמש במקדם התפשטות הנפחית γ נקבל:

$$V = V_0(1+\gamma\cdot\Delta t) \qquad (\gamma=\alpha+\beta=3\alpha) \qquad (9)$$

נסכם את שלושת התופעות של ההתפשטות התרמית: הקווית, השטחית והנפחית בתרשים.

$V = V_0(1+\gamma\cdot\Delta t)$ $\qquad$ $A = A_0(1+\beta\cdot\Delta t)$ $\qquad$ $L = L_0(1+\alpha\cdot\Delta t)$

$\gamma=\alpha+\beta=3\alpha$ $\qquad$ $\beta=2\alpha$

ברור, שניתן גם לרשום ביטויים תואמים עבור השינויים באורך, בשטח ובנפח:

$\Delta V = \gamma\cdot V_0\cdot\Delta T$ $\qquad$ $\Delta A = A_0\cdot\beta\cdot\Delta T$ $\qquad$ $\Delta L = \alpha\cdot L_0\cdot\Delta t$

התפשטות תרמית של נוזלים

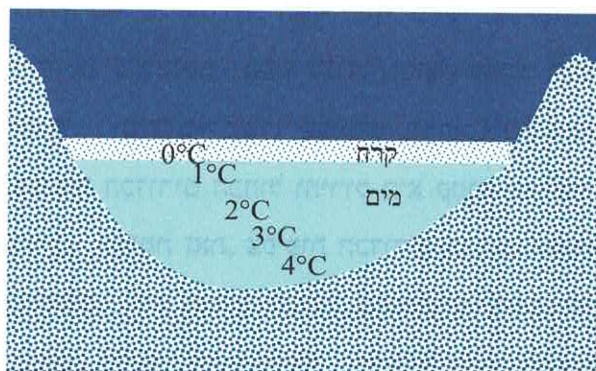
ברור, שעבור נוזלים נשאר לבדוק רק את ההתפשטות התרמית הנפחית בלבד. מקדמי ההתפשטות התרמית עבור כמה נוזלים הובאו בטבלה.

מן הטבלה ניתן להתרשם, שבהשוואה למוצקים, הערכים הם גדולים בסדר גודל אחד, אך עדיין נשארים מספרים קטנים. נציין את ייחודיות המים, נוזל החשוב במיוחד עבורנו.

ערכים של מקדם התפשטות תרמית נפחית עבור נוזלים שונים* $1/°C$ * הערכים עבור טמפרטורה של $20°C$.	
אצטון	$149.0\cdot10^{-5}$
כוהל	$112.0\cdot10^{-5}$
בנזין	$95.0\cdot10^{-5}$
גליצרין	$50.5\cdot10^{-5}$
כספית	$18.2\cdot10^{-5}$
טרפנטין	$97.3\cdot10^{-5}$
מים	$20.7\cdot10^{-5}$

עם ירידת הטמפרטורה המים מתכווצים, בדומה לחומרים אחרים, אך המגמה נמשכת רק עד $4°C$. לאחר מכן המגמה מתהפכת. כלומר, בירידת הטמפרטורה מ- $4°C$ ועד לקיפאון ב- $0°C$, המים מתרחבים דווקא. לתכונה זו, המכונה **האנומליות של מים**, השלכות חשובות ביותר עבור קיום החיים.

הודות לתכונה זו שכבות מים, בהן הטמפרטורה היא בין מעלה אחת עד לשלוש מעלות, צפות מעל לשכבת המים, בה הטמפרטורה היא 4°C (תרשים). בירידה נוספת של הטמפרטורה כל האגם מתכסה בשכבת קרח, בה הצפיפות קטנה יותר. כך קורה, שחיים יכולים לשרוד במים מתחת לקרח. לכך יש חשיבות גדולה בהתפתחות החיים על פני כדור הארץ.

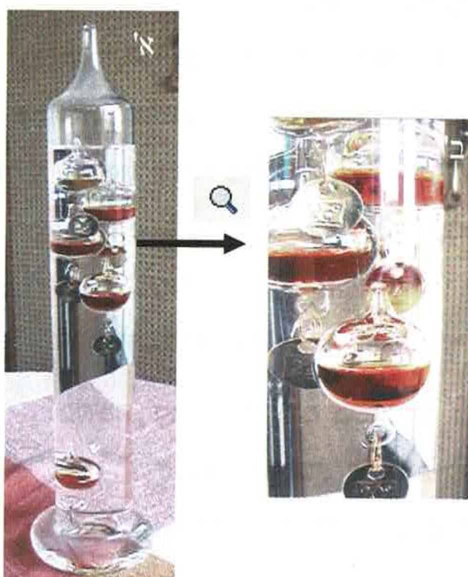


תרמומטר גלילאו

ציינו שנוזלים "אינם מתפשטים" עם עליית הטמפרטורה. טענה זו נכונה, ומוצדקת בהשוואה למוצקים וכמובן לגזים.

נציג כאן מכשיר שפעילותו מבוססת דווקא על ההתפשטות התרמית של המים, למרות המימדים הקטנים של התופעה.

מכשיר זה כולל כלי מלא במים, בו מספר כדורי זכוכית קטנים (תרשים א'). הכדורים הם חלולים, ובתוכם נוזל בצבעים שונים ובכמויות שונות. כל אחד מן הכדורים קשור ללוחית קטנה עליה מצוינת טמפרטורה מסוימת (תרשים ב').



הכדורים, יחד עם הלוחיות, הוכנו כך שלכולם צפיפות ממוצעת שונה במקצת זו מזו. לדוגמה, נחשוב על חמישה כדורים, ונניח שהם מסודרים בסדר צפיפויות עולה:

כחול – ρ_1, ירוק – ρ_2, צהוב – ρ_3, כתום – ρ_4, אדום – ρ_5

$$\boxed{\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 < \rho_5}$$

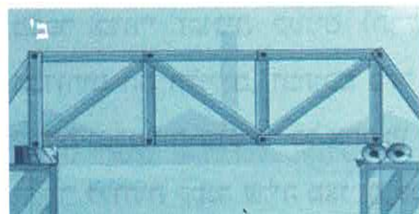
למדנו שעל גוף השקוע בתוך נוזל פועלים כוח הכובד וכוח העילוי מצד הנוזל. מצב הציפה נקבע על ידי הצפיפות הממוצעת של הגוף. הגוף ישקע, כאשר צפיפותו הממוצעת

גדולה מזו של הנוזל. הגוף יצוף, כאשר צפיפותו הממוצעת קטנה מזו של הנוזל, והגוף יהיה אדיש למיקומו בתוך הנוזל (ירחף) כאשר הצפיפות הממוצעת שלו משתווה לצפיפות הנוזל. נחשוב למשל, שבטמפרטורה 20°C צפיפות המים היא בדיוק ρ_3. במצב זה צפיפות הכדורים הכחול והירוק היא קטנה מזו של המים ולכן הם יצופו ליד המפלס של המים. לעומת זאת, צפיפות הכדורים הכתום והאדום היא גדולה מזו של המים, ולכן הם שוקעים. רק הכדור הצהוב שצפיפותו שווה לזו של המים בטמפרטורה 20°C יצוף במקום כלשהו בתוך המים. דואגים לסמן טמפרטורה 20°C בלוחית הקשורה לכדור הצהוב. כאשר טמפרטורת הסביבה עולה, נניח לטמפרטורה 21°C, המים מתפשטים וצפיפותם יורדת. בעקבות כך הכדור הצהוב ישקע והכדור הירוק יצוף בתוך המים. ברור שהקושי העיקרי בבניית תרמומטר מסוג זה הוא כיול מדויק של הכדורים בהתאם לצפיפויות, אך לאחר שנקבעו הצפיפויות (התואמות לצפיפות של מים בטמפרטורות שונות) יתפקד המכשיר עם דיוק די גבוה.

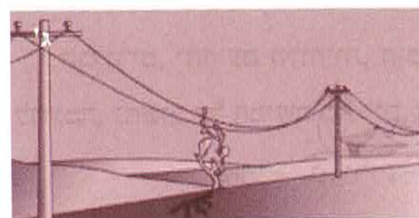
תופעות ושימושים של ההתפשטות התרמית של המוצקים



1. בבניית פסי רכבת יש להשאיר רווחים בין הקטעים לאורך המסילות, על מנת לאפשר למתכת להתפשט בימי הקיץ, מבלי לעוות את המסילה (תרשים א').



בדומה, בבניית גשרים משאירים בוני הגשר את אחד הקצוות חופשי, על מנת לאפשר את התפשטות המתכת בקיץ והתכווצותה בחורף (תרשים ב').בגשרים באורך של כ-3 קמ' השינוי באורך יכול להיות כמטר אחד.



2. בבניית קווי מתח גבוה, המקשרים בין תחנות הכוח לבין ערים, הנמצאות במרחקים של קילומטרים רבים, מתכננים חוטי חשמל כך, שהם תלויים במצב בו אינם מתוחים.

המראה האופייני הוא, שחוטי החשמל יוצרים קווים עקומים בין העמודים. אחת הסיבות לכך היא השינוי המשמעותי באורך החוטים המתכתיים בעונות השונות, כאשר הטמפרטורה משתנה בעשרות מעלות (תרשים ג').

3. שימוש נרחב קיבלה תופעת ההתפשטות התרמית השונה בחומרים שונים במתקן המכונה **"דו מתכת"**. המתקן מכיל שני לוחות מתכות, עבורן מקדמי ההתפשטות הקווית שונים במידה ניכרת. הלוחות מוצמדים זה לזה, והם בעלי אורך שווה בטמפרטורה של הסביבה (תרשים ד'). חימום צמד הלוחות יגרום להתארכות רבה יותר של הלוח בעל מקדם ההתפשטות הגבוה יותר. כתוצאה מכך יתכופף הצמד. קירור של הצמד לעומת הסביבה יגרום לכיפופו בכיוון ההפוך.



את כיפופי הצמד מנצלים במנגנון של תרמוסטטים, מכשירים המבצעים וויסות טמפרטורה במערכות שונות. צמד דו- מתכת פותח וסוגר את המעגל החשמלי בהתאם למצבו (תרשים ה') .כאשר הטמפרטורה אינה גבוהה, המוט ישר וקצהו נוגע במתג. במצב זה המעגל החשמלי סגור (תרשים שמאלי), וזורם בו זרם. כאשר הטמפרטורה במתקן עולה, והמוט מתכופף, המעגל נפתח והזרם נפסק (תרשים ימני). כאשר הטמפרטורה יורדת, מתיישר המוט חזרה ויוצר שוב את המעגל הסגור. תרמוסטטים מסוג זה פועלים במקרר, בתנורים, בדודי חימום, במגהץ ועוד.



4. ליצירת בטון מזוין יוצרים מבנה על ידי מוטות ברזל. את המבנה ממלאים בבטון. בנייה זו מבוססת על כך, שהן לבטון והן לברזל מקדמי התפשטות תרמית כמעט שווים.
5. בתכנון של מטוסים יש לקחת בחשבון שינויים קיצוניים של טמפרטורה בסביבת המטוס. גם החיכוך של גוף המטוס עם האוויר מחמם אותו. כל אלה גורמים לשינויי מימדי המטוס, שיכולים להגיע עד לסנטימטרים אחדים, ולא ניתן להתעלם מהתופעה.
6. החומרים, מהם נעשים הסתימות והכתרים בשיניים מחושבים היטב, בכדי להתאים למקדם ההתפשטות התרמי של רקמת השניים הטבעית. אי-ההתאמה הקטנה ביותר הייתה גורמת לכאבים ולהרס השניים.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1. מקררים כמות מים מסוימת מ- 10°C ל- 6°C, האם נכון שנפחם:

א.יגדל?

ב. יקטן?

ג. לא ישתנה?

ד. יגדל או יקטן בהתאם לנסיבות?

2. מקררים כמות מים מסוימת מ- 5°C ל- 2°C, האם נכון שנפחם:

א.יגדל?

ב. יקטן?

ג. לא ישתנה?

ד. יגדל או יקטן בהתאם לנסיבות?

3. באיזו עונה טמפרטורת המים באגם גבוהה מטמפרטורת האוויר שבחוץ?

א. בסתיו.

ב. בחורף.

ג. באביב.

ד. בקיץ.

4. דג נמצא באגם מכוסה קרח, כשברצונו להתחמם הוא שוחה:

א. לקרקעית האגם.

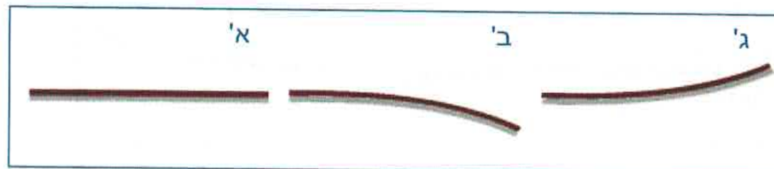
ב. לחלקו העליון של האגם.

ג. הצידה.

ד. באלכסון.

5. יש להיזהר משתיית נוזלים קרים אחרי אוכל חם כי:
   א. זה לא בריא.
   ב. זה מסוכן.
   ג. השיניים מתכווצות.
   ד. השיניים מתכווצות ומתפשטות לסירוגין ועלולות להתפורר.

6. התרשימים הבאים מתארים 3 מצבים של דו-מתכת. האם נכון ש:
   א. המטיל מחומם במצב א'?
   ב. המטיל מחומם במצב ב'?
   ג. המטיל מחומם במצב ג'?
   ד. לא ניתן לדעת באיזה מהמצבים המטיל מחומם?



7. בהשפעת חימום, משתנה:
   א. נפח החומר ומסתו.
   ב. צפיפות החומר ומסתו.
   ג. צפיפות החומר ונפחו.
   ד. צפיפות החומר, נפחו ומסתו.

8. כדור צף על פני מים שהטמפרטורה שלהם היא מעל 4°C. כאשר טמפרטורת המים תעלה :
   א. הכדור יעלה.
   ב. הכדור ירד.
   ג. הכדור יישאר במקומו.
   ד. הכדור ירחף במים.



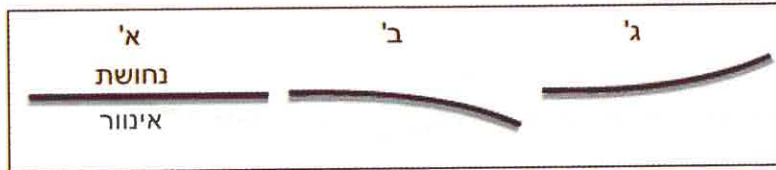
התפשטות מוצקים

1. מדוע יש להיזהר משתיית נוזלים קרים אחרי אוכל חם?

2. יוצקים לתוך כוס דקה חלב חם, והיא אינה מתפקעת, ואילו כשיוצקים לתוך כוס עבה חלב חם, הכוס עלולה להתפקע. הסבר מדוע.

3. הגדירו מהו מקדם התפשטות תרמית קווית.

4. התרשימים הבאים מתארים 3 מצבים של דו-מתכת, המורכבת מפס אינוור ופס נחושת. באיזה מצב המטיל הוא: 1) מחומם? 2) מקורר?



5. מה נדרש מחומר המילוי לסתימות בשיניים?

6. אם נמזוג תה חם לספל, העשוי מזכוכית עבה, הכוס עלולה להתפקע. לעומת זאת, במקרה דומה, ספל חרסינה נשאר שלם. לאיזה מבין החומרים מקדם התפשטות תרמית קטן יותר? נמקו.

7. הסבירו מה היה קורה במדחום כספית, אילו מקדם ההתפשטות של הכספית היה שווה לזה של הזכוכית.

8. לאן שוחה דג באגם מכוסה קרח,כשברצונו להתחמם?

9. מה משתנה בהשפעת חימום:

   א. נפח החומר או משקלו?

   ב. משקל החומר או צפיפותו?

10. מתי טמפרטורת המים באגם גבוהה מטמפרטורת האוויר שבחוץ: בקיץ או בחורף?

שאלות חישוב



1. סוללים מסילת ברזל באביב בטמפרטורה של $15°C$. אורך כל פס מתכת הוא $12\ m$. בקיץ המסילה עשויה להתחמם עד ל- $50°C$. איזה ריווח יש להשאיר בין הפסים?

2. אורכה של קורת ברזל ב- $2°C$ הוא $21\ m$. מה יהיה אורך הקורה בטמפרטורה של $102°C$?

3. מחברים פס ברזל ופס אבץ ויוצרים דו-מתכת. אורך כל אחד מהפסים $80\ cm$. מה יהיה ההפרש באורכם, לאחר שיחוממו מטמפרטורה של $18°C$ לטמפרטורה של $128°C$?

4. נפחה של כמות מים מסוימת בטמפרטורה $15°C$ הוא 100 סמ"ק. בכמה יגדל נפח המים:

   א. כשיתחממו עד ל- $65°C$?

   ב. כשירתחו?

5. אל תוך מיכל ששטח בסיסו 20 מ"ר, ייצקו מים עד גובה 4 מטר מעל לקרקעית. טמפרטורת המים הייתה $20°C$. מה יהיה נפח המים בטמפרטורה $70°C$?

תשובות

1. 0.504 ס"מ

2. 21.0252 מטר

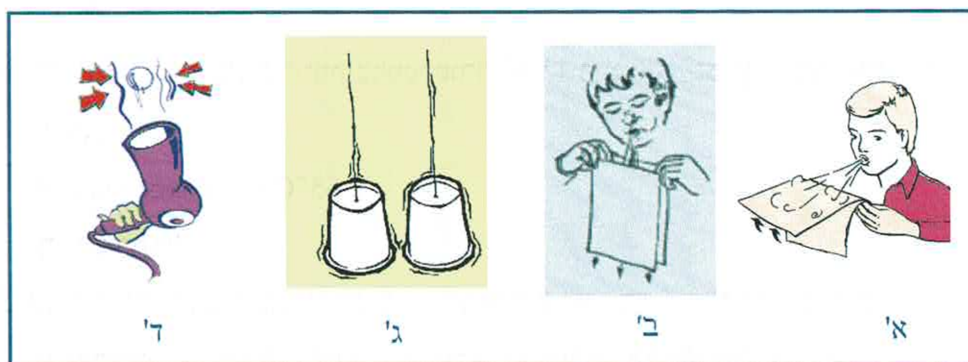
3. 0.2112 ס"מ

4. א. 1.035 סמ"ק ב. 1.7595 סמ"ק

5. 80.828 מטר מעוקב.

ייחודיות האינטראקציה בין חלקיקי החומר במצב צבירה נוזלי וגזי גורמת לכך, שתנועת הזורם, אם זה נוזל או גז, מלווה בתופעות, שאינן קיימות ללא התנועה. תופעות אלו קיבלו הסבר במסגרת התיאוריה המכונה הידרודינמיקה, בניגוד להידרוסטטיקה, אותה כבר הכרנו. לתחום זה חשיבות רבה, משום שתופעות רבות בתחום זה משרתות את האדם בצרכיו החשובים ביותר. לכן השליטה בכלי טייס ושייט שונים, הבנה של תנועת הציפורים, מערכת הדם האנושית, תופעות במזג האוויר – כל אלה ורבות אחרות מקבלות הסבר במסגרת התאוריה של ההידרודינמיקה.

את ייחודיות התופעות בהידרודינמיקה ניתן להדגים במצבים הפשוטים מאוד לביצוע. כך הזרמת אוויר ליד דף נייר גורמת לדף להתרומם (תרשים א'). באופן דומה יתקרבו זה לזה שני ניירות (תרשים ב') או כוסות קלקר תלויות (תרשים ג').



מעניינת במיוחד היא תופעת ריחוף כדור קל באוויר, המוזרם על ידי מייבש שיער (תרשים ד'). הכדור ירחף, ואף יראה יציבות מסוימת, כאשר יחזור למרכז הזרימה לאחר סטיות קלות הצידה.

את כל התופעות ניתן להסביר על ידי הנחה, שבאזור הזרימה מתפתח תת לחץ לעומת האזורים, בהם אין זרימה, או קיימת זרימה איטית יותר. עקב כך, על הגופים המצויים בתוך הזורם, מופעל כוח, הדוחף או מושך את הגוף לתוך הלחץ הנמוך יותר.


דניאל ברנולי
1782 – 1700

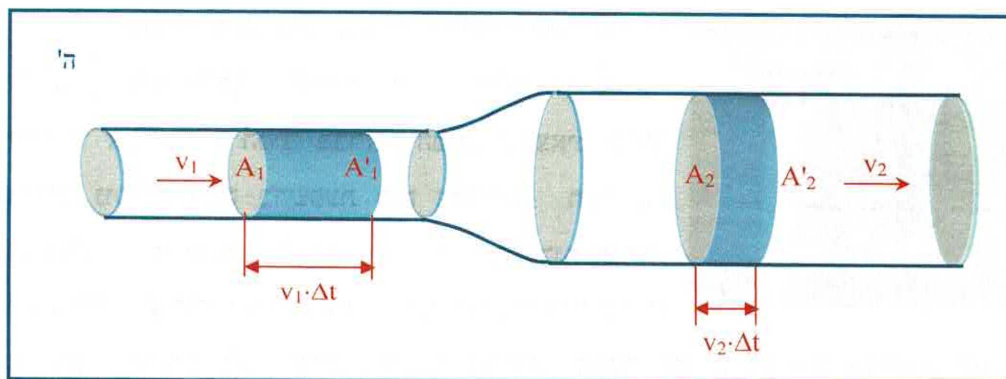
לאחר שהידע על המכניקה החדשה התפשט לארצות שונות באירופה, דניאל ברנולי, מדען שוויצרי דגול אשר עבד ברוסיה, ניסה במאה ה-18 ליישם את המכניקה החדשה לזורמים. הוא חקר את החוקיות הקיימת בין גורמים שונים, המאפיינים את תנועת הזורמים, את הקשר בין מהירות הזורם, את הגובה, בו הוא נמצא מעל האופק, ובין הלחץ השורר בו. באופן איכותי נוכל כבר לסכם את החוק, אליו הגיע, לגבי זרימת הנוזלים בצינורות:

> בזרימת נוזל בצינור לחץ הנוזל עולה במקומות, בהם הזרימה היא איטית יותר.

נכיר את מסקנות המחקר של ברנולי באופן כמותי, מדויק יותר, כפי שאנו יכולים לעשות זאת כיום. נבנה ידע זה על בסיס העקרונות הבסיסיים, אותם הכרנו.

משוואת הרציפות בנוזלים

נחשוב על הנוזל בתנועה איטית, כאשר מסלולי התנועה של חלקיקיו מהווים קווים, אשר אינם מתעקמים יותר מדי, זאת אומרת, בתוך הנוזל לא נוצרות מערבולות מסוגים שונים. התנועה ה"שקטה" הזאת מכונה בשם תנועה "למינרית". נדמיין, שזרימה זו קיימת בתוך צינור, אשר במקום מסוים מתרחב ועובר משטח A_1 לשטח A_2 (תרשים ה'). בעקבות כך משתנה מהירות הנוזל.



ניתן להסביר זאת: דרך חתך הצינור בעל שטח A_1 במשך פרק הזמן Δt יעבור הנוזל, אשר ממלא גליל בעל שטח בסיס A_1 ואורך $v_1 \cdot \Delta t$ (זהו המרחק שיעבור הנוזל, הנכנס דרך השטח בתחילת פרק זמן זה). הנפח V_1 של כמות נוזל זו הוא:

$$V_1 = v_1 \cdot \Delta t \cdot A_1 \qquad (1)$$

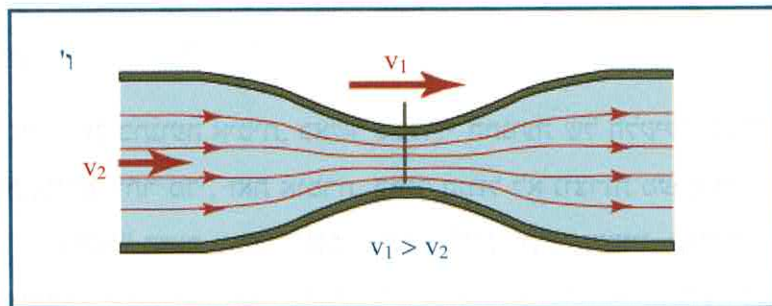
בעקבות כך, שהנוזל שומר על צפיפותו ועל רציפות הזרימה (שום חלק מן הנוזל לא נעלם וגם לא מתווסף בדרך) ניתן לטעון, שגודלו של הנפח, העובר דרך שטח A_1 (1), שווה לנפח הנוזל (2), שיעבור באותו פרק זמן Δt דרך השטח A_2 בצינור הרחב יותר:

$$V_2 = v_2 \cdot \Delta t \cdot A_2 \qquad (2)$$

השוואה ביניהם מאפשרת מסקנה חשובה:

$$\boxed{v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2} \qquad (3)$$

קשר זה מעיד על כך, שבזרימה **רציפה** של נוזל **לא דחיס**, כאשר שטחו של הצינור קטן, מהירות הזרימה בו גדלה (תרשים ו'). משוואה (3) מכונה משוואת הרציפות של הנוזל, כי קיומה נובע מהדרישה של רציפות הזרימה.





בין התופעות החשובות, בהן ניתן לראות ביטוי לקשר זה שבין שטח החתך למהירות הזרימה של הנוזל, אפשר להזכיר את זרימת המים מברז. המים, היוצאים מתוך הברז, נופלים מטה בהשפעת כוח הכבידה. תוך כדי הנפילה הם מואצים, כמו כל גוף נופל. בעקבות הגדלת המהירות ורציפות הזרימה גודל חתך הזרימה קטן באופן הדרגתי (תרשים ז'). הקטנת השטח נפסקת, כאשר נפסקת רציפות הזרימה, המים מתפצלים למספר זרימות וטיפות רבות.

בזרימת דם בעורקים מתרחשת תופעה לא רצויה של הצטברות חומר, פלאק, על דפנות כלי הדם. בעקבות כך מהירות זרימת הדם עולה באותם המקומות. רובד של פלאק גורם להקשחתו של העורק, איבוד גמישותו וסכנת סתימתו ושבירתו של העורק (תרשים ח'). לכן, כדרך אפשרית של טיפול, מנסים להרחיב את כלי הדם באופן מלאכותי על ידי הכנסה של תמך מתכתי לתוך העורק.



גם בזרימת מים בנהר ניתן לראות את הזרימה האיטית של המים באפיק הרחב לעומת המקומות, בהם עובר הנהר בפרוזדור צר.

משוואת הרציפות בגז

כיצד ישתנו השיקולים שהפעלנו במקרה של גז? השיקול הבסיסי של הרציפות נשאר בתוקף (תרשים ה'): כמות הגז, העוברת דרך חתך הצינור בעל שטח A_1 במשך פרק הזמן Δt חייבת לעבור גם דרך חתך הצינור בעל שטח A_2 באותו הזמן. כלומר, עתה נרשום שוויון עבור כמות החומר ולא עבור הנפח. כמות החומר m_1 העוברת דרך A_1 היא:

$$m_1 = \rho_1 \cdot V_1 \qquad (4)$$

על סמך ביטוי (1) עבור הנפח V_1 נקבל:

$$m_1 = \rho_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \cdot A_1 \qquad (5)$$

באופן דומה נקבל ביטוי עבור כמות החומר m_2 , העוברת דרך A_2:

$$m_2 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \cdot A_2 \qquad (6)$$

כאמור הרציפות מחייבת שוויון בין (5) ו-(6) ולכן מקבלים:

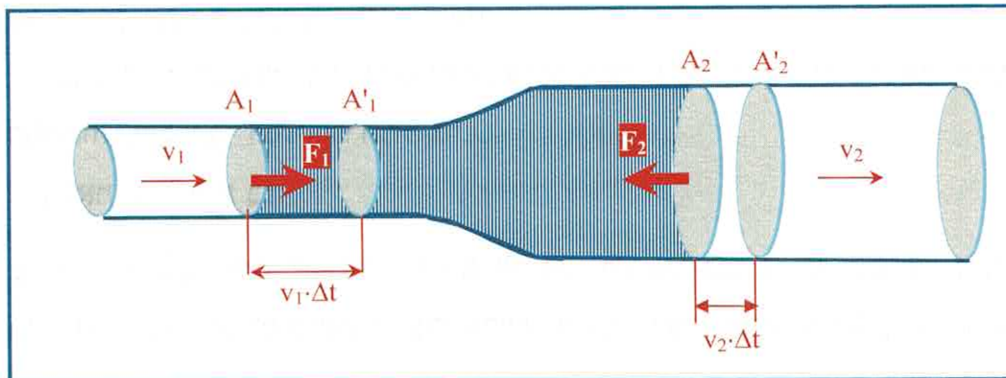
$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \cdot A_2 \qquad (7)$$

כלומר, במקרה של גז משתנה התוצאה (3), והופכת ליותר מורכבת:

$$\boxed{\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2\, A_2} \qquad (8)$$

נמשיך את הדיון על מנת לקבל את הקשר הכמותי עבור שינויי הלחץ בתוך הזורם.

בעזרת שיקולים של שימור האנרגיה המכנית של הזורם במהלך תנועתו, נמצא את הקשר בין הלחצים לבין מהירויות הנוזל, הנמצא בצינור אופקי או משופע. תחילה נחזור לתרשים ה', אך נסתכל עליו אחרת. נעיין בנפח הזורם, הכלוא בצינור בין השטחים A_1 ו- A_2 (תרשים ט'). לאחר פרק הזמן Δt נפח זה יזוז ויתפוס מקום בין השטחים A'_1 ו- A'_2. נסתכל עליו כבעל גוף אחד, אשר נתון לכוחות F_1 ו- F_2, הפועלים עליו מצד הנוזל השכן. כוחות אלה מבצעים עבודה, ומשנים את מצבו של הגוף הנוזלי. נחשב עבודה זו:



העבודה של הכוח F_1 היא:

$$W_1=F_1\cdot v_1\cdot\Delta t = p_1\cdot A_1\cdot v_1\cdot\Delta t = p_1\cdot V_1 \qquad (9)$$

כאן השתמשנו בביטוי (1) עבור הנפח V_1 והקשר בין הכוח והלחץ, השורר באותו מקום בנוזל לפי הגדרת המושג לחץ: $F = p\cdot A$. העבודה של הכוח F_2 היא:

$$W_2=F_2\cdot v_2\cdot\Delta t = p_2\cdot A_2\cdot v_2\cdot\Delta t= p_2\cdot V_2 \qquad (10)$$

כאן השתמשנו בביטוי (2) עבור הנפח V_2.

הכוחות פועלים במנוגד זה לזה, ולכן העבודה הכללית היא:

$$W=W_1- W_2= p_1\cdot V_1 - p_2\cdot V_2 = (p_1 - p_2)\cdot V \qquad (11)$$

השתמשנו גם בעובדה, שהנוזל אינו דחיס, ולכן: $V_1 = V_2 = V$.

כתוצאה מהעבודה הזאת השתנה מצבו של הגוף הנוזלי, והוא נע במהירות שונה.

שינוי זה מתבטא בשינוי באנרגיה קינטית של מסת נוזל בעל צפיפות נפח V:

$$\Delta E^{kin} = E^{kin}{}_1 - E^{kin}{}_2 =$$

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2-\frac{1}{2}m_2v_2^2=\frac{1}{2}\rho\cdot V\cdot v_1^2-\frac{1}{2}\rho\cdot V\cdot v_2^2=\left(\frac{1}{2}\rho\cdot v_1^2-\frac{1}{2}\rho\cdot v_2^2\right)\cdot V \qquad (12)$$

אם נשווה בין ביטויים (11) ו- (12) נקבל:

$$p_1-p_2=\frac{1}{2}\rho\cdot v_1^2-\frac{1}{2}\rho\cdot v_2^2 \qquad (13)$$

ניתן לכתוב אותה בצורה אחרת:

$$\boxed{p_1+\frac{1}{2}\rho\cdot v_1^2=p_2+\frac{1}{2}\rho\cdot v_2^2} \qquad (14)$$

מפרשים משוואה זו כעדות לסוג מיוחד של לחץ הקיים בתוך הנוזל – לחץ קינטי, כלומר, לחץ הקשור לתנועת הנוזל. זאת לעומת הלחץ הסטטי p, שלא קשור לתנועת הנוזל:

$$\boxed{p_{kin}=\frac{1}{2}\rho\cdot v^2} \qquad (15)$$

בעקבות הגדרה זו המשוואה של ברנולי (14) הופכת להיות לטענה, שסכום הלחצים בנוזל נשאר קבוע בכל נקודה:

$$p_1^{stat}+p_1^{kin}=p_2^{stat}+p_2^{kin} \qquad (16)$$

או:

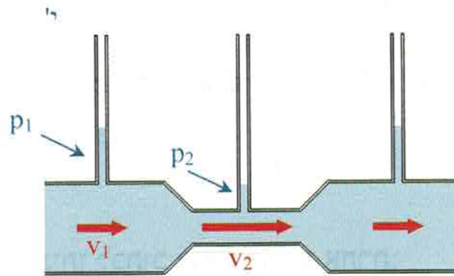
$$\boxed{p_{stat}+p_{kin}=const} \qquad (17)$$



בכל מקום, בו קיימת זרימה של הנוזל, סכום הלחצים, הסטטי והקינטי, נשאר קבוע – זהו חוק ברנולי.



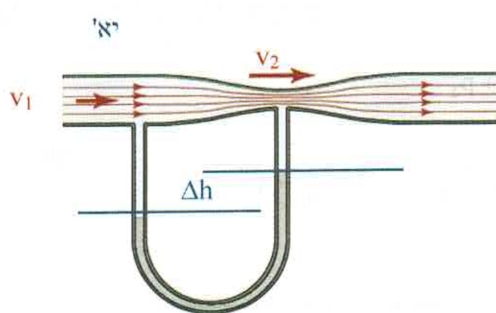
חוק ברנולי מסביר, מדוע הגדלה במהירות הנוזל מלווה בהקטנת הלחץ בו. מדובר בהקטנת הלחץ הסטטי.



1. <u>צינור ונטורי.</u> צינור ונטורי הוא צינור צר, המחובר לצינור, בו זורם נוזל בצידו האחד, והפתוח מצידו השני. בתרשים י' מוצגים שלושה צינורות כאלה, המחוברים במקומות שונים של זרימת הנוזל. אופן החיבור של הצינור לזורם גורם לכך, שגובה עמוד הנוזל שבו מעיד על ההפרש בין הלחץ הסטטי p בתוך הנוזל והלחץ האטמוספרי. בתרשים ניתן לראות, שהלחץ הסטטי משתנה לאורך הצינור, בו זורם הנוזל. במקומות הצרים חייב הנוזל לזרום מהר (בהתאם למשוואת הרציפות $v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$). הגדלת המהירות גורמת להקטנת הלחץ הסטטי, לפי משוואת ברנולי:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^{\,2}}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^{\,2}}{2} \qquad (14)$$

מאחר ו-v_2 גדול מ-v_1 מתקיים כי $p_1 > p_2$.



מדידה זו יכולה לשמש אומדן למהירויות הזרימה. למשל, במכונות רבות נפוץ השימוש במכשיר מהסוג המתואר בתרשים יא'.

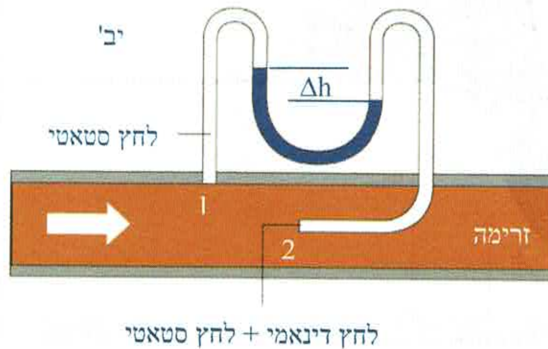
את הפרש הגבהים של הנוזל בזרועות המכשיר מתרגמים למהירות הזרימה בעזרת ביטוי (14):

$$\rho_0 \cdot g \cdot \Delta h = \frac{1}{2}\rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) \qquad (18)$$

כאשר ρ_0 היא צפיפות הנוזל במכשיר המדידה, ו- ρ היא צפיפות הנוזל בצינור הראשי. ממשוואת הרציפות נובע: $v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$. אחרי הצבה בביטוי (18) נקבל את המהירות הלא ידועה של הנוזל v_1:

$$v_1^2 = \frac{2\rho_0 g \cdot \Delta h}{\rho \cdot \left[\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1\right]} \qquad (19)$$

2. צינור פיטו



על מנת למדוד את הלחץ הדינאמי משתמשים במכשיר אחר, המכונה צינור פיטו (תרשים יב'). אחד הפתחים של הצינור מחובר לצינור הראשי במקביל לזרימה (בדיוק כמו בצינור ונטורי – פתח 1). הפתח השני פתוח חזיתית אל הזרימה (פתח 2). הזורם למעשה עוצר לחלוטין ליד הפתח. לאור הנאמר, בפתח 1 של המכשיר ישרור לחץ סטטי – p_{stat} ובפתח 2 – ישרור הן הלחץ הסטטי והן הלחץ הדינאמי (קינטי): $p_{stat} + p_{kin}$. לכן הפרש הגבהים של הנוזל בצינור U יהיה מתכונתי להפרש הלחצים בפתחים, והוא p_{kin}. ניתן לתרגם אם כן את הפרש הגבהים לביטוי, המאפשר קביעת מהירות הזורם:

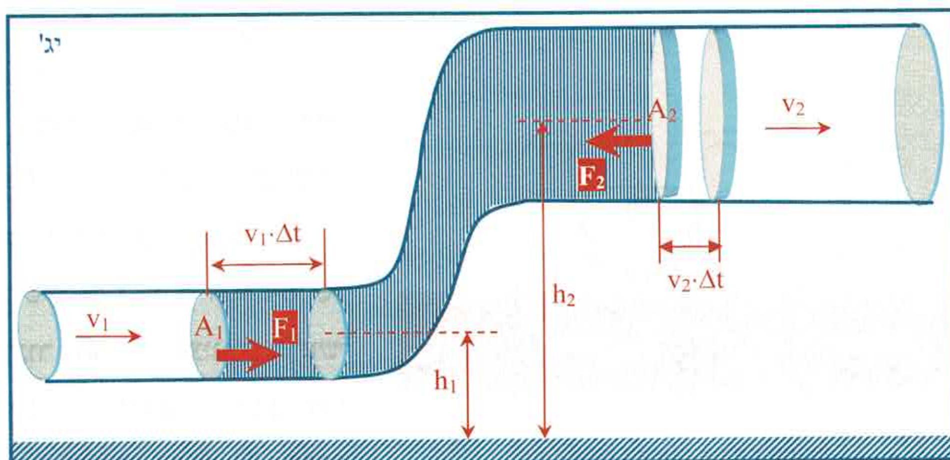
$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \rho_0 g \cdot \Delta h \qquad (20)$$

שוב, כאשר ρ_0 היא צפיפות הנוזל במכשיר המדידה, ו- ρ היא צפיפות הנוזל בצינור הראשי. מכאן מקבלים את המהירות הלא ידועה של הזורם v:

$$v^2 = 2g\frac{\rho_0}{\rho} \cdot \Delta h \qquad (21)$$

משוואת ברנולי עם הפרשי גובה

משוואת ברנולי עבור הנוזל הזורם (13) התקבלה, כאשר שני הצינורות היו באותו גובה מעל האופק. כאשר מתווסף הפרש הגבהים בין הצינורות, העבודה של הכוחות הפועלים על נפח V של הנוזל גורמת לא רק לשינוי באנרגיה הקינטית של הנוזל, אלא גם לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית הכובדית של הנוזל (תרשים יג').



לכן ניתן במקום משוואה (13) לרשום:

$$(p_1 - p_2)V = \left(\frac{mv_2^2}{2} + mgh_2\right) - \left(\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1\right) \qquad (22)$$

או:

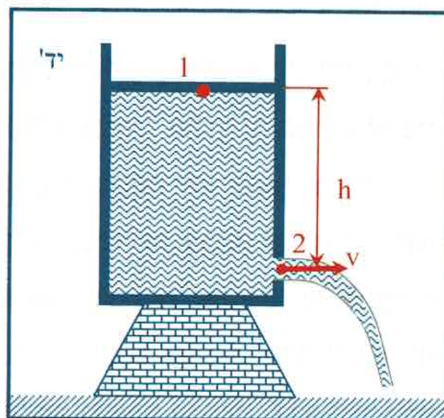
$$p_1 - p_2 = \left(\rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}\right) - \left(\rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2}\right) \qquad (23)$$

במקום משוואה (14) נקבל עבור כל שתי נקודות בתוך הנוזל את משוואת ברנולי בצורה:

$$\boxed{p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}} \qquad (24)$$

את משוואת ברנולי בנוכחות הפרש גובה h בין הצינורות (24) ניתן להציג כטענה, שהסכום של שלושה גורמים נשאר קבוע עבור כל נקודה בנוזל:

$$\boxed{p_{stat} + p_{kin} + \rho g h = const} \qquad (25)$$



מקרה פרטי חשוב של משוואת ברנולי קיבל תלמידו של גלילאו, טוריצ'לי, עוד לפני מחקרו של ברנולי. זהו המקרה של יציאת נוזל מתוך מיכל דרך פתח קטן, הנמצא בעומק h מתחת למפלס הנוזל (תרשים יד').

על מנת למצוא את מהירות יציאת הנוזל מתוך המיכל נרשום את משוואת ברנולי עבור שתי הנקודות 1 ו-2.

ביטוי (23) עבור הפרשי הלחץ הסטטי בין שתי הנקודות יהיה:

$$p_1 - p_2 = \rho gh - \frac{1}{2}\rho v^2$$

היות והלחצים p_1 ו-p_2 שווים (אותו לחץ אטמוספרי מחוץ למיכל), נקבל:

$$\rho gh = \frac{1}{2}\rho v^2$$

ועבור מהירות הנוזל ביציאה מן המיכל:

$$v = \sqrt{2gh} \qquad (26)$$

תוצאה זו מהווה משפט טוריצ'לי.

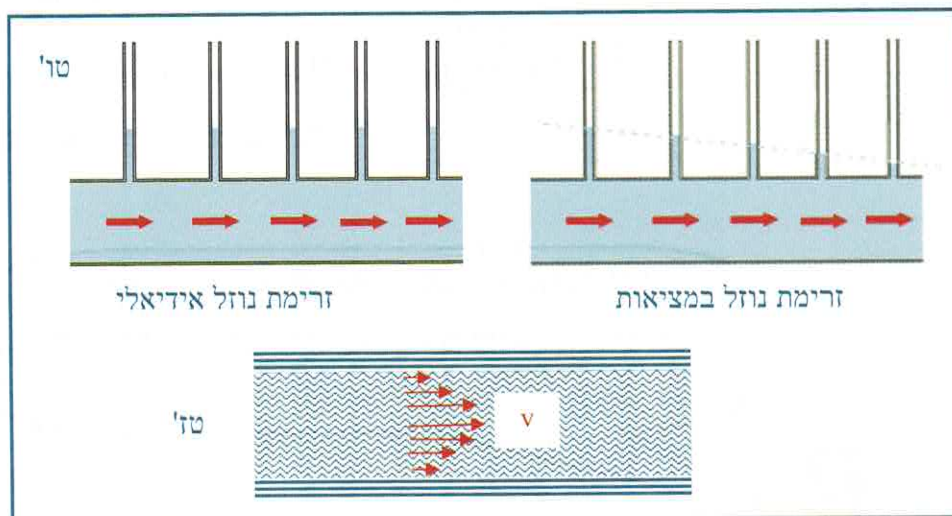
מעניין, שמהירות היציאה של הנוזל מן המיכל שווה למהירותו של גוף, שהיה נופל באופן חופשי מן הגובה h.



כאמור, הדיון שקיימנו עסק בנוזל אידיאלי בזרימה איטית (למינארית) ללא מערבולות. המציאות היא כמובן שונה, והגורם הראשון לשינוי הוא החיכוך הפנימי, הקיים בתוך הנוזל האמיתי. חיכוך זה שונה מהחיכוך, הקיים בין גופים מוצקים בכך, שהוא נושא אופי נפחי, ולכן קשה יותר לתארו במדויק.

חיכוך פנימי זה מכונה **צמיגות** (viscosity), והוא גורם לסטיות מתיאור הנוזל, כפי שנובע ממשוואת ברנולי. כך למשל הניסיון מראה, שגם בזרימה של נוזל ללא שינויי גובה או קוטר הצינור, יורד הלחץ לאורך הצינור (תרשים טו'). זאת בזמן שמהירות הזרימה נשארת קבועה! (לא יכול להיות אחרת עקב רציפות הנוזל). אנו מסבירים זאת הן על ידי החיכוך הפנימי בתוך הנוזל והן על ידי החיכוך בין הנוזל ודפנות הצינור. ברור, שנוזלים שונים הם בעלי צמיגות שונה. בין הנוזלים הצמיגים במיוחד אפשר להזכיר את הדבש והגליצרין. כמובן,גם כל הדבקים למיניהם הם צמיגים במיוחד.

בתנועת נוזל צמיג בתוך הצינור שכבות הנוזל ליד הדפנות כמעט ולא זזות. מהירות הזרימה עולה בהדרגתיות עם ההתרחקות מדפנות הצינור (תרשים טז').





אחד הביטויים לקיומה של הצמיגות הוא הופעת כוח חיכוך, הבולם את תנועתם של הגופים בתוך הנוזל (נוזל אידיאלי לא היה אמור להתחכך עם גוף מוצק סימטרי אלא לעקוף אותו בלבד). אם נפיל כדור מתכת קטן אך כבד דיו בתוך צינור מלא נוזל (תרשים יז'), ונעקוב אחרי נפילתו, נוכל לגלות, שהכדור מאיץ בתחילת הדרך, ומהר מאוד מגיע לתנועה במהירות קבועה. זאת לעומת התנועה המואצת, כשנפילת הכדור היא ללא תווך או בתווך דליל מאוד.

החוק השני של ניוטון מאפשר להסביר את שני המקרים: בנפילה חופשית, כידוע, פועל על הגוף כוח הכובד, והוא מאיץ אותו בתאוצה קבועה (כאשר הכוח הוא קבוע). לעומת זאת קיום התנועה במהירות קבועה מצביע על כך, שהכוח השקול הפועל על הגוף מתאפס.



הכוחות הפועלים על הכדור הם G – כוח הכובד, F_A – כוח העילוי (ארכימדס), ו-F_{fric} – כוח החיכוך (תרשים יח'). כנראה בתחילת הנפילה של הכדור, כוח החיכוך היה קטן, ושקול הכוחות האיץ את הכדור. עם הגדלת המהירות גדל גם כוח החיכוך, עד שהכוח השקול התאפס, ותנועת הכדור הפכה להיות קצובה (במהירות קבועה). במצב זה מתקיים:

$$0 = G - F_A - F_{fric}$$

המחקר הניסיוני מראה, שבמהירויות נמוכות הכוח המעכב F_{fric} תלוי באופן ליניארי ברדיוס r של הכדור, במהירותו v ובצמיגותו η של הנוזל (המאפיין נוזל מסוים, ותלוי גם בטמפרטורה):

$$F_{fric} = \eta \cdot r \cdot v \qquad (27)$$


ג'ורג' סטוקס
1819-1903

תלות זו ידועה בשם חוק סטוקס (על שם המדען האנגלי, שחקר תופעות בנוזלים במאה ה- 19). המהירות בה מתקיימת התאפסות של הכוח השקול, הפועל על הכדור הנופל, מכונה "המהירות הגבולית". עתה נמצא אותה.

היות וכוח העילוי של גוף בעל נפח V בתוך נוזל בעל צפיפות ρ_L הוא: $F_A = \rho_L \cdot g \cdot V$, והמסה של הגוף היא: $m = \rho_B \cdot V$ נקבל:

$$\rho_B \cdot V \cdot g - \rho_L \cdot g \cdot V - \eta \cdot r \cdot v_t = 0$$

ומכאן עבור המהירות הגבולית:

$$v_t = \frac{V \cdot g}{\eta \cdot r}(\rho_B - \rho_L)$$

ברור, שבמקרה של כדור ניתן לפשט את הביטוי עוד יותר ולקבל:

$$\boxed{v_t = \frac{4\pi \cdot g}{3\eta} r^2 (\rho_B - \rho_L)}$$

נשים לב שביטוי (27), חוק סטוקס, תקף רק במהירויות קטנות. במהירויות גדולות ניתן להראות, שגודל החיכוך עולה בקשר ישר לחזקה השנייה של המהירות:

$$\boxed{F_{fric} \propto v^2} \qquad (27)$$

אווירודינמיקה

בדיון הקודם התייחסנו בעיקר להידרודינמיקה. משוואת ברנולי תקיפה, בתנאי שמדובר בנוזל, שאינו דחיס. המצב משתנה לגמרי בגז. כפי שכבר ראינו במשוואת הרציפות, משוואה (8) לעומת משוואה (3). לא נוכל לטפל בדינמיקה של הגז באותו אופן בו טיפלנו בנוזל, ונצטרך לתאר רק את העקרונות, ללא חישוב כלשהו. עם זאת מושגים כמו לחץ דינאמי ולחץ סטטי יעילים בתיאור של הגזים. מתברר שגם עקרון ברנולי, שהעליה במהירות הגז מלווה בירידת הלחץ הסטטי, נשאר בתוקף, ועל סמך עיקרון זה ניתן להסביר תופעות רבות בטבע ובטכנולוגיה.

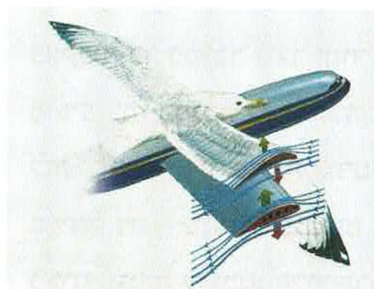


משוואת ברנולי תקיפה עבור נוזל, שאינו דחיס

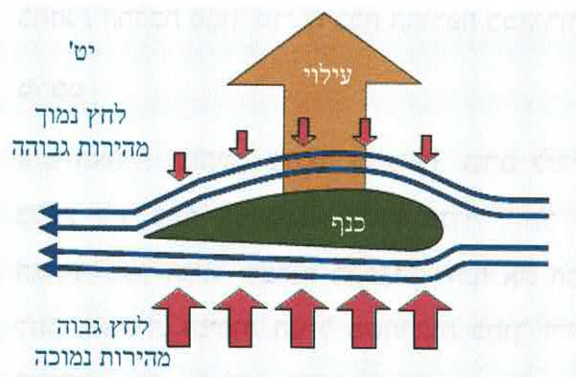


למרות זאת הניסיון מראה, **שעיקרון ברנולי** נשאר בתוקף גם עבור גזים.

טיסה



התופעה הבולטת הן בטבע והן בטכנולוגיה היא יכולת הטיסה של גופים הודות לכוח העילוי הדינאמי, התואם לעקרון ברנולי, ולא הודות לכוח העילוי הסטטי (של ארכימדס, כמו במקרה של כדור פורח).



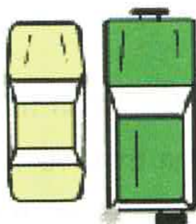
הרכיב המרכזי של כלי הטייס הוא הכנף. לכנף פרופיל מיוחד לא סימטרי (תרשים יט'), כך שהאוויר, הנע מעליהן, עובר דרך ארוכה יותר מזו, שעובר האוויר הזורם מתחת לכנף. נוצר מצב, בו מהירות האוויר מעל הכנף היא גדולה יותר, והלחץ הסטטי של האוויר על הכנף קטן יותר מן הלחץ של האוויר מתחת לכנף. הפרש הלחצים גורם לכוח עילוי, הפועל על הכנף. לעיקרון זה שותפים גם בעלי הכנף בעולם החי.

השפעת רוח



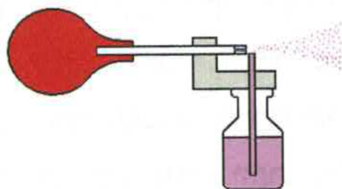
בזמן סופה, אוויר זורם במהירות גבוהה מאוד מעל לגגות. נוצר הפרש לחצים בין החלל שמתחת לגג לבין זה שמעליו. כתוצאה מכך מופעל על הגג כוח עילוי, והגג עלול להתעופף. פרופיל הגג משפיע על גודל הכוח: גג משולש דומה יותר לכנף, וסיכוייו לעוף גבוהים יותר. תופעה דומה ניתן לחוות כאשר מחזיקים מטריה ברוח.

שמירת מרחק



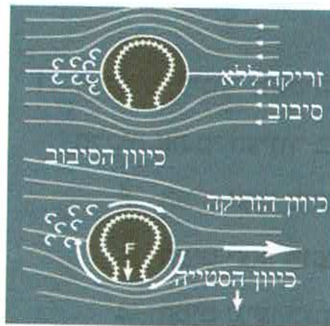
תופעה מעניינת ומסוכנת כאחד מתרחשת, כאשר שני כלי רכב או כלי שייט נעים במקביל, למשל, בזמן עקיפה. נוצרת זרימה מהירה של הזורם במעבר הצר שבין שני כלי הרכב (או השייט). בעקבות כך במעבר נוצר אזור לחץ נמוך יותר מזה שמחוצה לו. מופיע כוח במגמה לקרב ולהדביק את כלי הרכב או השייט זה לזה. תופעה זו מהווה גורם לתאונות ואף לאסונות כבדים. מסיבה דומה מסוקים נמנעים מלהתקרב לצוקים גבוהים או לבניינים. גם נהגים בעלי ניסיון מנסים להימנע מלהתקרב לרכב אחר או לקיר בנין. מאותה סיבה לא צריך לעמוד בתחנת הרכבת סמוך מדי לרכבת החולפת במהירות גבוהה.

מרסס



זרם האוויר המהיר, שנוצר בנשיפה, גורם לירידה בלחץ ליד פתח המרסס. הלחץ הגדול יותר של האוויר מעל הנוזל שבתוך הבקבוק דוחף את הנוזל לתוך הצינור, וטיפות הנוזל משתלבות בתוך זרימת האוויר. כך מתרחש ריסוס. למאייד, במנוע של המכונית, עיקרון דומה. זרימה של דלק שואפת לתוכה אוויר, ונוצרת תערובת שריפה במנוע.

משחקי כדור



שחקנים מנוסים במשחקי ספורט שונים כגון טניס, כדור בסיס, כדורגל, גולף וכו' יודעים, שאם גורמים לכדור מהירות סיבובית גדולה סביב צירו ("ספין"), מסלולו יתעקם ובמיוחד קשה יהיה לנבא את כיוון החזרתו ממשטח כלשהו. כוח החיכוך בין שטח הפנים המחוספס של הכדור והאוויר גורם לשכבות האוויר, הצמודות לכדור, להצטרף לסיבוב של הכדור, ונוצרת מערבולת אוויר סביב הכדור. בצד אחד של הכדור זרימה זו מתחברת עם זרימת האוויר עקב התקדמותו, ובצד ההפוך - שתי הזרימות מתנגדות זו לזו. עקב כך, נוצרים לחצים שונים של האוויר משני צידי הכדור. מופיע כוח, שמסיט את הכדור הצידה ממסלולו. אפקט זה מכונה בפיזיקה **אפקט מאגנוס**, על שמו של מדען גרמני, שחקר את התופעה במאה ה- 19.

השטת ספינות:

1. ספינות מפרש



ניווט ספינת מפרש דורשת מיומנות רבה. כאשר נושבת רוח מהצד לספינה, הופך המפרש הנפוח לכנף. האוויר זורם סביב המפרש, ובשני צידיו נוצרים אזורים, בהם לחץ שונה. עקב כך, בדיוק כמו בכלי טייס, מופיע כוח עילוי בכיוון של הצד הקמור של המפרש, וגורם לדחיפת הספינה הצידה. אם החובל אינו מודע לתופעה, הספינה עלולה להתהפך.

2. ספינות גלילים



עקרון השייט של ספינות אלו מבוסס על אפקט מאגנוס, אותו הזכרנו כדי להסביר תנועה מוזרה של הכדור, הנזרק בסיבוב עצמי. באופן דומה פועלים על הספינה גלילים אנכיים גדולים, המוקמים על סיפון הספינה. הגלילים סובבים באמצעות מנועים. כמו סביב הכדור, נוצרת מערבולת סביב הגלילים וכוח "העילוי" המניע את הספינה.



שאלות הבנה וחשיבה – לדיון בכיתה

1. מכוונים צינור השקיה כלפי מעלה, כאשר סותמים חלקית את פי הצינור באצבע:



א. המים יצאו מהצינור בלחץ גדול יותר.

ב. המים יצאו מהצינור במהירות גבוהה יותר.

ג. המים יגיעו לגובה קטן יותר.

ד. המים יצאו מהצינור באותה המהירות.

2. מה עדיף לטייס לעשות בזמן המראה, אם הוא מעוניין, שהמטוס יתנתק מהר יותר מהקרקע:

א. לכוון את המטוס בכיוון, המקביל לכיוון הרוח.

ב. לכוון את המטוס בכיוון נגדי לרוח.

ג. לכוון את המטוס בכיוון מאונך לרוח.

ד. לכוון את המטוס בכיוון של $45°$ לכיוון הרוח.

3. הכנפיים של מטוסי קרב הן יחסית קטנות:

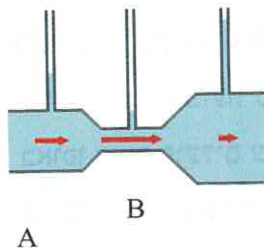
א. כי מהירות המטוס גבוהה.

ב. כי השטח הקטן משפר את העילוי.

ג. כדי ליצור הפרש לחצים קטן בין חלקה העליון לבין החלק התחתון של הכנף.

ד. כדי ליצור הפרש לחצים גדול בין חלקה העליון לבין החלק התחתון של הכנף.

4. נתון צינור, שקוטרו אינו אחיד. האם נכון ש:



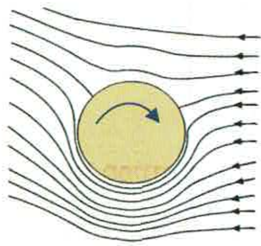
א. מהירות הזרימה בצינור בחלק A היא גבוהה ׳

ב. מהירות הזרימה בצינור בחלק B היא גבוהה ׳

ג. מהירות הזרימה זהה בשני החלקים ?

ד. הלחץ מעל צינור A הוא קטן יותר ?

5. כדור טניס מקבל חבטה בכיוון ימינה, ונע כמתואר בתרשים. בעקבות תנועת הכדור שמאלה:



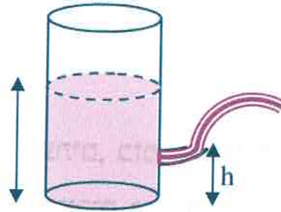
א. מסלולו יתעקם כלפי מעלה.

ב. מסלולו יתעקם כלפי מטה.

ג. מסלולו לא ישתנה.

ד. הכדור ייעצר.

6. נוזל נמצא בכלי בגובה H מעל לקרקעיתו. בגובה h נמצא פתח, דרכו יוצאים מים. האם נכון, שלאחר צאתם מהפתח, המים:



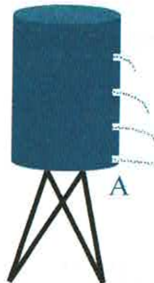
א. יגיעו עד לגובה של פני המים ?

ב. יגיעו עד לגובה H מהקרקעית ?

ג. יגיעו עד לגובה H מעל הפתח ?

ד. יגיעו לגובה פחות מהגובה H ?

7. על שולחן ניצב כלי מלא מים. מנקבים בדופן הכלי ארבעה נקבים קטנים, כמתואר בתרשים. האם נכון ש:



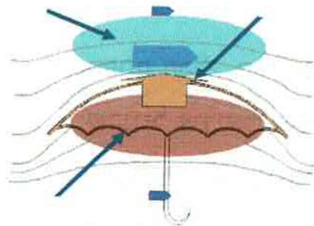
א. מהירות המים, היוצאים מנקב A היא הגבוהה ביותר ?

ב. הלחץ, השורר בפתח A, הוא הקטן ביותר ?

ג. המים, היוצאים מפתח A, יעברו את המרחק האופקי הגדול ביותר ?

ד. כל התשובות נכונות ?

8. ביום גשום וסוער המטרייה עשויה לעוף כלפי מעלה. הסיבה לכך היא:



א. מהירות זרימת האוויר בתחתית המטריה גבוהה מזו שמעלייה.

ב. לחץ האוויר בתחתית המטריה נמוך מזה שמעלייה.

ג. אין הפרש לחצים בין חלקה העליון לחלקה התחתון של המטרייה.

ד. כל התשובות אינן נכונות.



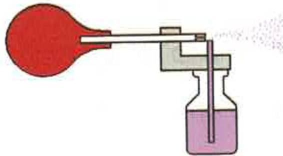
הידרודינמיקה



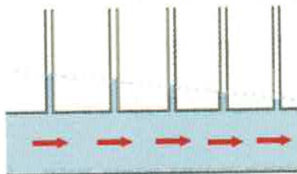
1. שתי ספינות שטות בכיוון מקביל לא רחוק זו מזו. הסבירו, מדוע נוצר כוח משיכה בין הספינות.



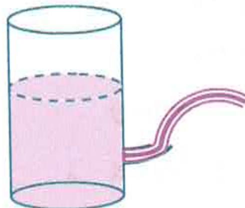
2. לעתים, בזמן רוח חזקה, המטריה הפתוחה, אותה מחזיקים בידיים, מתקפלת כלפי מעלה. הסבירו מדוע.



3. מהו עקרון פעולתו של המרסס.



4. מתקינים לאורכו של צינור מים בעל קוטר זהה מספר מדי לחץ (מסוג צינור ונטורי). מדוע מורים מדי הלחץ על ירידה הדרגתית בגודל הלחץ?

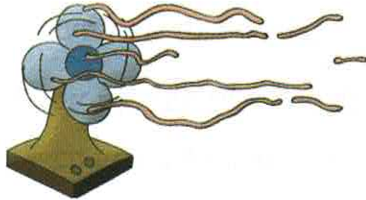


5. מפתח הכלי, המתואר בתרשים, יוצאים מים. בהנחה שהנוזל אידיאלי, עד לאיזה גובה יעלו המים, היוצאים מהפתח? איזה גורם משפיע על הגובה, אליו יעלו המים?

6. נסחו את חוק ברנולי, והביאו שתי דוגמאות לשימוש בו.

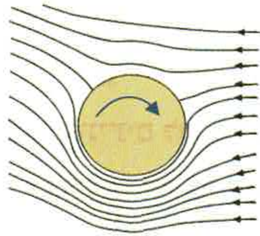
עבור איזה זורם תקף החוק?

7. ציינו היכן בקרבת המאוורר ממוקמים:

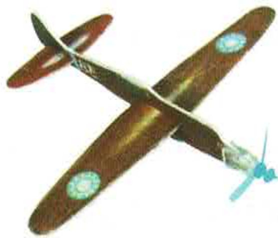


א. אזורים בהם מהירות הזרימה גבוהה, ואזורים בהם היא נמוכה.

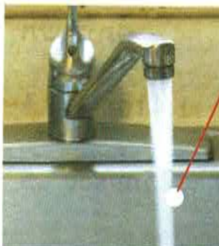
ב. אזורים בהם שורר לחץ נמוך, ואזורים בהם שורר לחץ גבוה.



8. הכדור שבתרשים נזרק בכיוון ימינה, כשהאוויר זורם שמאלה. קיבעו את הכיוון, בו יתעקם מסלולו של הכדור. הסבירו, כיצד קבעתם את צורת המסלול.



9. מדוע שטח הכנפיים של מטוסים ישנים ודאונים הוא גדול יחסית לשטח הכנפיים של מטוסי קרב מודרניים?



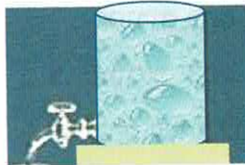
10. מקרבים כדור טניס שולחן, המחובר לחוט, לזרם המים מהברז. הכדור שואף להישאר בתוך הזרם גם כאשר מושכים אותו החוצה. הסבירו התנהגות זו.



שאלות חישוב



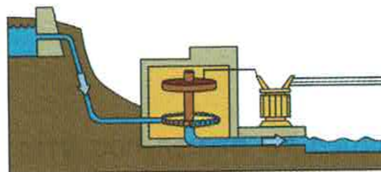
1. על שולחן ניצב כלי ובו מים. גובה פני המים $H=40$ cm. בדופן הכלי מנקבים נקב קטן בעומק $h=10$ cm מתחת לפני המים (תרשים). חשבו את מהירות המים, היוצאים מהנקב, מיד עם היציאה מהנקב.



2. פני המים במיכל מגיעים לגובה של 10 m. מהי המהירות בה זורמים המים מברז, הנמצא בגובה של 1.55 m מעל לתחתית המיכל?

3. מים זורמים בצינור אופקי בעל קוטר משתנה. מהי מהירות הזרימה במקום, בו שטח החתך הוא $4\cdot10^{-4}\ m^2$, אם המהירות במקום, בו השטח הוא $8\cdot10^{-4}$ m, שווה ל- $1\frac{m}{sec}$?

4. מעוניינים להכפיל את מהירות הזרימה של צינור בעל קוטר פנימי של 8 cm. מה צריך להיות קוטרו של הצינור המחליף?



5. מים גולשים מגובה של 31.5m על גלגל טורבינה, הנמצא בתחתית הסכר. מהי מהירות המים בהגיעם לטורבינה?



6. ממיכל גלילי, שגובהו 0.8 m זורמים מים מהפתחים שבדופן הצדדי שלו. הפתחים נמצאים במרחק של 20 cm זה מזה, החל ממפלס המים. חשבו את המהירות, בה זורמים המים מכל פתח.

תשובות

1. 1.41m/sec **2.** 13m/sec **3.** 2m/sec **4.** 5.656 cm

5. 25m/sec **6.** 2m/sec, 2.82m/sec, 3.464m/sec, 4m/sec.

גדלים,יחידות,חוקים, נוסחאות וקבועים פיסיקליים

גודל	יחידה	סימון	נוסחה
אורך	מטר m	L	
שטח	מטר בריבוע m^2	S	
נפח	מטר בשלישית m^3	V	
זמן	שנייה sec	t	
העתק	מטר m	x	
מהירות	$\frac{m}{sec}$	V	$V=\frac{\Delta x}{\Delta t}$
מהירות האור	$3\cdot10^8\frac{m}{sec}$	c	
תאוצה	$\frac{m}{sec^2}$	a	$a=\frac{\Delta V}{\Delta t}$
נוסחאות תנועה בתאוצה קבועה			$V=V_0+a\cdot t$ $\Delta x=V_0t+\frac{1}{2}at^2$ $\Delta x=(\frac{V_0+V_T}{2})\cdot t$ $V^2=V_0^2+2\cdot a\cdot\Delta x$
תאוצה רדיאלית	$\frac{m}{sec^2}$	a_R	$a_R=\frac{v^2}{R}$
מהירות הזוויתית	$\frac{rad}{sec}$	ω	$\omega=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$
זמן מחזור	sec	T	$T=\frac{2\pi}{\omega}$
תדירות	$\frac{1}{sec}$	f	$f=\frac{1}{T}$
מסה	קילוגרם kg	M	
כוח	ניוטון N	F	
החוק הראשון של ניוטון			$F_R\equiv\sum_i F_R=0$
החוק השני של ניוטון			$F_R=m\cdot a$
החוק השלישי של ניוטון			$F_{1\to2}=-F_{2\to1}$
תאוצת הכובד	$9.8\frac{m}{sec^2}$	g	
תנע	$kg\cdot\frac{m}{sec}$	p	$p=m\cdot V$
מתקף	$N\cdot sec$	J	$J=F\cdot\Delta t=\Delta p$

גודל	יחידה	סימון	נוסחה
חוק שימור התנע			$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2$
קבוע הקפיץ	$\frac{N}{m}$	k	
חוק הוק			$F=k\cdot\Delta L$
מקדם חיכוך סטטי		μ_s	
כוח חיכוך סטטי	N		$fs_{max}=\mu_s\cdot N$
מקדם חיכוך קינטי		μ_k	
כוח חיכוך קינטי	N		$fk = N\cdot\mu_k$
מומנט הכוח	$N\cdot m$	τ	$\tau = F_{\perp}\cdot L$
קבוע המשיכה העולמי	$6.67\cdot10^{-11}\frac{N\cdot m^2}{kg^2}$	G	
כוח המשיכה העולמי	N		$F^{grav}=G\frac{m_1m_2}{R^2}$
מטען חשמלי	קולון C	Q	
מטען האלקטרון	$-1.6\cdot10^{-19}\ C$	e	
מסת האלקטרון	$9.1\cdot10^{-31}kg$	m_e	
מטען הפרוטון	$1.6\cdot10^{-19}\ C$		
מסת הפרוטון	$1.67\cdot10^{-27}kg$	m_p	
קבוע הכוח החשמלי	$9\cdot10^9\frac{N\cdot m^2}{C^2}$	K	
חוק קולון	N		$F_e=K\cdot\frac{Q\cdot q}{R^2}$
שדה חשמלי	$\frac{N}{C}$	E	$E=\frac{F_e}{q}$
עבודה	ג'ול j	W	$W=F\cdot x$
אנרגיה	ג'ול j	E	$W=\Delta E$
אנרגיה קינטית	ג'ול j	E_k	$E_{kin}=\frac{m\cdot V^2}{2}$
אנרגיה פוטנציאלית	ג'ול j	E_p	$E^{grav}=m\cdot g\cdot h$
אנרגיה אלסטית	ג'ול j	E_{el}	$E^{elastic}=\frac{1}{2}k\cdot(\Delta L)^2$

גודל	יחידה	סימון	נוסחה
אנרגיה פנימית	ג'ול j		$\Delta E_{heating} = c \cdot m \cdot \Delta T$
טמפרטורה	מעלות צלסיוס	$^{\circ}C$	
חום סגולי	$\frac{j}{kg \cdot {}^{\circ}C}$	c	
קיבול חום	$\frac{j}{{}^{\circ}C}$	H	$H = \frac{\Delta E_{heating}}{\Delta T} = m \cdot c$
עבודת הכוח החשמלי	ג'ול j		$W_{electric} = q \cdot U_{12}$
מתח חשמלי	וולט V	U	$U_{12} = \frac{W_{electric}}{q}$
זרם חשמלי	אמפר A	I	$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$
התנגדות	אוהם Ω	R	$R = \rho \frac{L}{S}$
חוק אוהם			$U = I \cdot R$
הספק חשמלי	וואט w	P	$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$
נגדים בטור			$I_{tot} = I_1 = I_2 = I_3$ $U_{tot} = U_1 + U_2 + U_3$ $R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3$
נגדים במקביל			$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3$ $U_{tot} = U_1 = U_2 = U_3$ $\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$
מתח הדקים			$U_R = \varepsilon - I \cdot r$
לחץ	פסקל $\frac{N}{m^2}$	p	$P = \frac{F}{S}$
מכבש הידראולי			$\frac{A_1}{A_2} = \frac{h_2}{h_1}$ $\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$
משקל סגולי	$\frac{N}{m^3}$	d	$d = \frac{G}{V}$
מסה סגולית (צפיפות)	$\frac{kg}{m^3}$	ρ	$\rho = \frac{m}{V}$
לחץ הידרוסטטי		p	$p = h \cdot g \cdot \rho$
כוח ארכימדס			$F = V \cdot g \cdot \rho' = V \cdot d'$
חוק בויל - מריוט			$P \cdot V = K_t$

גודל	יחידה	סימון	נוסחה
חוק גי-לוסק			$\frac{V}{T} = K_P$
חוק שארל			$\frac{P}{T} = K_V$
משוואת המצב מנדלייב-קלפירון			$\frac{P \cdot V}{T} = K_m$
לחץ של גז			$P = \frac{2}{3} E_1^{kin} \cdot n$
התפשטות תרמית קווית			$L = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$
התפשטות תרמית שטחית			$A = A_0(1 + \beta \cdot \Delta t)$
התפשטות תרמית נפחית			$V = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$
משוואת הרציפות			$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$
חוק ברנולי			$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho {v_1}^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho {v_2}^2}{2}$
משפט טוריצ'לי			$v = \sqrt{2gh}$
חוק סטוקס			$F_{fric} = \eta \cdot r \cdot v$
המהירות הגבולית בתוך נוזל בעל צפיפות ρ_L			$v_t = \frac{4\pi \cdot g}{3\eta} r^2 (\rho_B - \rho_L)$

אינדקס

(המספרים מציינים את מספרי העמודים שבהם דנו ב...)

1 ק"ג 81
1 ניוטון 82
1 קולון 241
1 ג'ול 274
1 וולט 422
1 אמפר 424
1 אוהם 422
1 פסקל 469
1 אטמוספירה 469

א

אווירודינמיקה - 630
אורסטד - 262
אילן רמון - 151
אלקטרוני הולכה - 423
אלקטרונים חופשיים - 423
אמפר - 257
אנרגיה - 284,279
אנרגיה גרעינית - 283
אנרגיה חשמלית - 280
אנרגיה כימית - 281
אנרגיה מגנטית - 281
אנרגיה פוטנציאלית אלסטית - 281,332
אנרגיה פוטנציאלית כבדית - 280,316
אנרגיה פנימית - 280,409
אנרגיה קינטית - 353,279
אנרגיית קול - 282
אנרגיית קרינה - 282
אריסטו - 11,50,72

ב

בורג ואום - 300
בורלי - 207
ברומטר - 537
ברומטר אנרואידי - 529
ברנולי - 619

ג

גאות ושפל - 228
ג'ול - 274
גוף טעון חיובית - 239
גוף טעון שלילת - 239
גוף נייטרלי - 239
גילברט - 261
גלגילה וגלגלת - 304
גלגל וציר - 302
גלילאו - 43,49
גריקה - 532

ד

דו מתכת - 613
דקארט - 561
דרך - 15

ה

החוק השלישי - 83
החוק השני - 80
המכוש ההידראולי - 481
הספק חשמלי - 444
העתק - 15
התנגדות - 431
התנגדות פנימית - 445
התנגשויות - 375
התנגשות אלסטית - 107
התנגשות פלסטית - 107
התפוצצות - 382
התפשטות קווית - 607
התפשטות תרמית - 605
התפשטות תרמית משטחים - 609
התפשטות תרמית נוזלים - 610
התפשטות תרמית נפחים - 609

ז

זמן מחזור - 55
זרם חשמלי - 422

ח

חום היתוך - 407
חום התאדות - 408
חום התעבות - 408
חום כמוס - 408
חום סגולי - 398
חום קיפאון - 407
חוסר משקל - 147
חוק אוהם - 431
חוק ארכימדס - 542,586
חוק בויל- מריוט - 588
חוק ברנולי - 623

חוק גילוסק - 591
חוק ההתמדה - 78
חוק הוק - 120
חוק הכלים השלובים - 520
חוק סטוקס - 629
חוק פסקל - 480,584
חוק קולון - 240,420
חוק קולון לקטבים מגנטיים - 256
חוק שארל - 595
חוק שימור התנע - 106
חוקי כוח - 72
חיבור נגדים בטור - 438
חיבור נגדים במקביל - 440
חיכוך סטטי - 176,178
חיכוך קינטי - 184,185

ט

טוריצ'לי - 528
טמפרטורה - 393,599
טסלה - 260
טעינה - 238

י

יחס ישר - 118
יציבות - 565
יתד - 298
יתרון מכאני - 201

כ

כא"ם - 445
כדורי מגדנבורג - 532
כוח - 66
כוח אלסטי - 69,115
כוח החיכוך - 68
כוח הידרוסטטי - 502
כוח הכובד - 125
כוח המשיכה העולמי - 224,420
כוח מגנטי - 70
כוח נורמלי - 125
כוח פיסי - 67
כוח שקול - 79
כוחות במגע - 66
כוחות מרחוק - 69
כמות התנועה - 102

ל

לאונרדו דה וינצ'י - 207
לחץ - 469
לחץ אטמוספירי - 527
לחץ הידרודינמי - 478
לחץ הידרוסטטי - 478,503

מ

מאזני כפות - 168
מבודדים - 423
מגנט - 266

מד זרם - 437
מד כוח - 119
מד מתח - 437
מהירות זוויתית - 54
מהירות ממוצעת - 17
מהירות קבועה - 19
מהירות רגעית - 18
מוליכות - 431
מומנט הכוח - 196
מומנט שקול - 198
מזלף - 591
מטען חשמלי - 237
מישור משופע - 296
מכונות פשוטות - 276
מנדלייב - 597
מנוף - 200,295
מנוף מהסוג הראשון - 202
מנוף מהסוג השני,השלישי והרביעי- 203
מסה - 81,162,163
מסה סגולית - 492
מסלול התנועה- 12
מצבי הצבירה - 405
מצבים עמידים - 428
מקור מתח - 425
מרכז הכובד - 208
משאבה יונקת - 590
משוואת ברנולי - 622
משוואת המצב - 597
משוואת הרציפות - 619
משפט טוריצ'לי - 627
משקל - 143,145
משקל סגולי - 495
מתח הדקים - 445
מתח חשמלי - 421
מתיחות אלסטית - 130
מתקף - 103

נ

ניוטון - 51,72,82
נפילה - 43

ס

סיפון - 524

ע

עבודה - 274

פ

פרדוקס הידרוסטטי - 504

צ

צוללן קרטזי - 561
צוללת - 561
צינור ונטורי - 624
צינור פיטו - 625
ציפה - 557
צלזיוס - 593
צמיגות - 628
צפיפות - 492

ק

קווי שדה חשמלי - 247
קופרניקוס - 51
קטבים מגנטיים - 254
קיבול חום - 400
קלאוזיוס - 599
קלווין - 593
קליפרון - 597
קרינה אלקטרומגנטית - 410
קרינה קוסמית - 410

ר

רוטנברג - 328
רחיפה - 559

ש

שדה חשמלי - 244
שדה מגנטי - 258
שדה מגנטי של כדור הארץ - 261
שיווי משקל - 212
שיווי משקל אדיש - 214
שיווי משקל יציב - 212
שיווי משקל רופף - 213
שקיעה - 556

ת

תאוצה - 22
תאוצה צנטרפיטלית - 52
תאוצה קבועה - 23
תאוצת הנפילה - 165
תדירות - 55
תהליך אכדותרמי - 404
תהליך אנדותרמי - 404
תהליכי מעבר - 428
תמסורת - 307
תמסורת גלגלי שיניים- 308
תמסורת רצועה - 307
תנועה - 11
תנועה בליסטית - 46
תנועה מורכבת - 43
תנועה מעגלית - 51
תנע - 102
תרמומטר גלילאו - 611